مقدمة قصيرة جدًّا




برايان تشارلزوورث وديبورا تشارلزوورث

# التطوُّر

# التطوُّر

## مقدمة قصيرة جدًّا

**تأليف**
**برايان تشارلزوورث وديبورا تشارلزوورث**

ترجمة
محمد فتحي خضر

مراجعة
هبة عبد العزيز غانم



# التطوُّر

# Evolution

برايان تشارلزوورث
وديبورا تشارلزوورث

Brian Charlesworth
and Deborah Charlesworth

**الطبعة الأولى ٢٠١٦م**
رقم إيداع ١٤٣٨٢ / ٢٠١٥
جميع الحقوق محفوظة للناشر مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة
المشهرة برقم ٨٨٦٢ بتاريخ ٢٦ / ٨ / ٢٠١٢

**مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة**
إن مؤسسة هنداوي للتعليم والثقافة غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبِّر الكتاب عن آراء مؤلفه
٥٤ عمارات الفتح، حي السفارات، مدينة نصر ١١٤٧١، القاهرة
جمهورية مصر العربية
**تليفون:** ٢٢٧٠٦٣٥٢ ٢٠٢ + **فاكس:** ٣٥٣٦٥٨٥٣ ٢٠٢ +
**البريد الإلكتروني:** hindawi@hindawi.org
**الموقع الإلكتروني:** http://www.hindawi.org

تشارلزوورث، برايان.
التطوُّر: مقدمة قصيرة جدًّا/تأليف برايان، ديبورا تشارلزوورث.
تدمك: ٩٧٨ ٩٧٧ ٧٦٨ ٣١٠ ٤

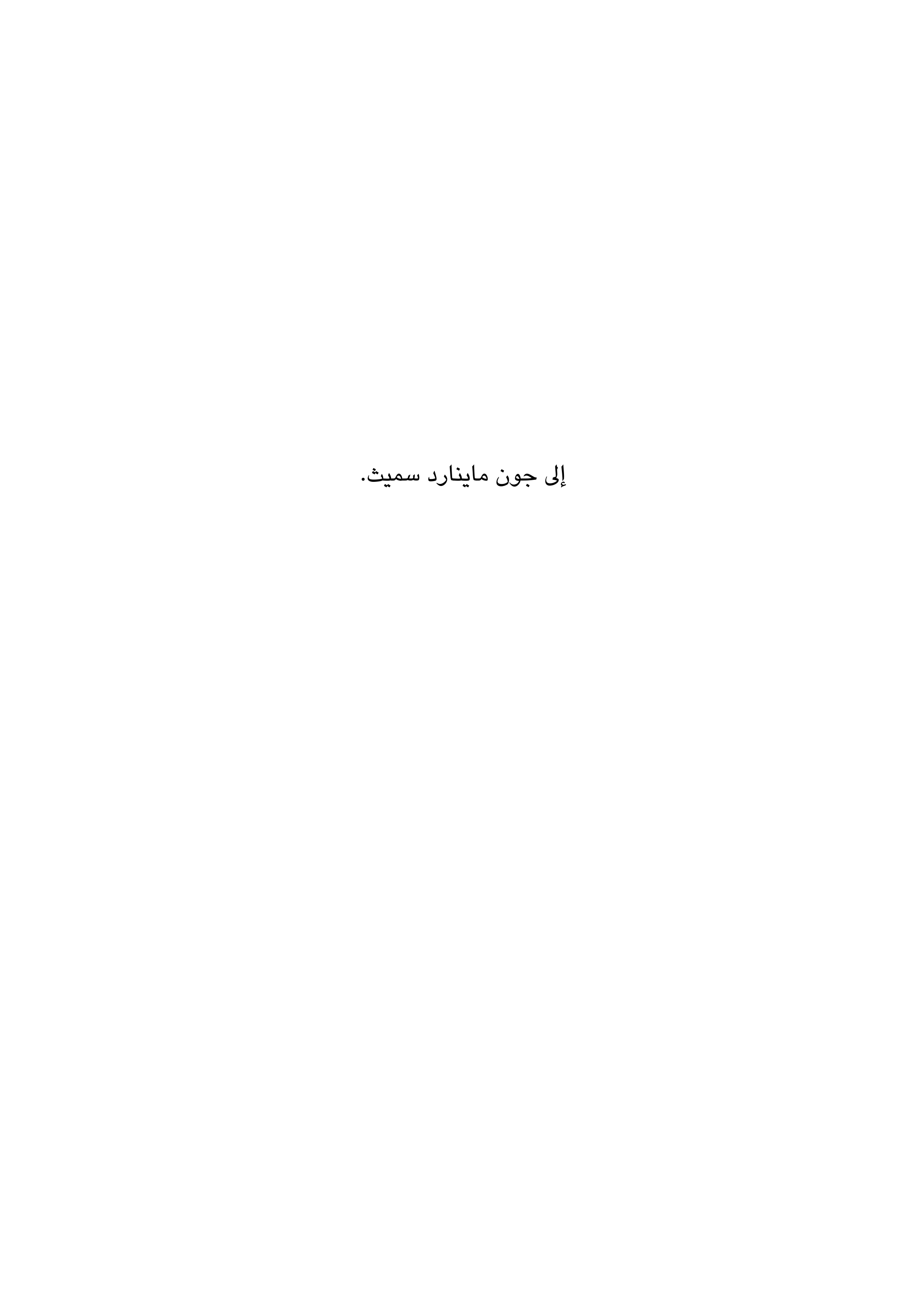
١–النشوء والارتقاء
٢–التطور

أ–العنوان

٥٧٧

تصميم الغلاف: إيهاب سالم.

# المحتويات



إلى جون ماينارد سميث.

# شكرٌ وتقدير

نشكر كلًّا من شيلي كوكس وإيما سيمونز من مطبعة جامعة أكسفورد؛ إذ اقترحت الأولى علينا تأليف هذا الكتاب وتولَّتِ الثانية تحريره. كما نشكر هيلين بورذويك وجين تشارلزوورث وجون ماينارد سميث لقراءة المسوَّدة الأولى لمخطوطة الكتاب والتعليق عليها. وأية أخطاء موجودة هي، بالطبع، مسئوليتنا نحن.

الفصل الأول

# مقدمة

ما نحن جميعًا سوى أشياء زاحفة،
والقِرَدة والبَشَر
هم إخوة في الدم.

من قصيدة «أغنية الشُّرب» لتوماس هاردي

يُجمِع المجتمع العلمي على أن الأرض كوكب عادي يدور حول نجم عادي تمامًا، نجم موجود ضمن ملياراتٍ عِدَّةٍ من النجوم داخل مجرَّة، وهذه المجرَّة موجودة ضمن ملياراتٍ عِدَّةٍ من المجرات داخل كون هائل الحجم آخِذٍ في التمدُّد، نشأ منذ أربعة عشر مليار عام. تكوَّنت الأرض نفسها نتيجة عملية تكثُّف جذبي للغبار والغاز، وهي العملية التي أدَّت أيضًا إلى نشأة الشمس والكواكب الأخرى في المجموعة الشمسية، منذ نحو ٤٫٦ مليارات عام. إن جميع الكائنات الحية الموجودة في يومنا الحالي مُنحدرة من الجزيئات الذاتية النسخ التي تكوَّنت بوسائل كيميائية خالصة، منذ أكثر من ٣٫٥ مليارات عام. وقد أُنتجت صور الحياة التالية بواسطة عملية «الانحدار مع التعديل»، كما أسماها داروين، وهي مرتبطة بعضُها ببعض عن طريق سلسلة نَسَب متفرِّعة؛ أي شجرة الحياة. وأقرب الكائنات إلينا — نحن البشر — الشمبانزي والغوريلا، وهما النوعان اللذان كان يجمعنا بهما سَلَف مشترك من ٦ إلى ٧ ملايين عام مضت. أما الثدييات، تلك المجموعة التي ننتمي إليها، فكان يجمعها سَلَف مشترك مع الزواحف الموجودة حاليًّا منذ نحو ٣٠٠ مليون عام. وتعود أصول كل الفقاريات (الثدييات والطيور والزواحف والبرمائيات والأسماك) إلى ذلك الكائن الصغير الشبيه بالسمكة، والذي كان يفتقر إلى عمود فقري، وكان يعيش

منذ أكثر من ٥٠٠ مليون عام. أما إذا رجعنا إلى وقت سابق على ذلك الزمن، فسيصبح من الصعب على نحو متزايد تبيُّن العلاقات بين المجموعات الكبيرة للحيوانات والنباتات والميكروبات، ومع هذا سنرى أن المادة الوراثية لهذه الكائنات تحمل علامات واضحة على وجود سَلَف مشترك.

منذ أقل من ٤٥٠ عامًا مضت، كان جميع الدارسين الأوروبيين يؤمنون أن الأرض هي مركز الكون، وأن هذا الكون لا يتجاوز نطاقه بضعة ملايين من الأميال، وأن الكواكب والشمس والنجوم كلها تدور حول هذا المركز. ومنذ أقل من ٢٥٠ عامًا مضت، آمَن الجميع أن الكون خُلِق في حالته الحالية منذ نحو ٦٠٠٠ عام مضت، بالرغم من أنه كان معروفًا في ذلك الوقت أن الأرض تدور حول الشمس، شأنها شأن الكواكب الأخرى، وكان من المتفق عليه بشكل واسع أن الكون يتمتَّع بحجم أكبر. ومنذ أقل من ١٥٠ عامًا مضت، كانت الفكرة السائدة بين العلماء هي الفكرة التي تقضي بأن الحالة الحالية لكوكب الأرض هي نتاج ما لا يَقِلُّ عن عشرات الملايين من الأعوام من التغُّير الجيولوجي، لكن الاعتقاد بأن الأنواع الحية صُنِعت خِصِّيصَى بِيَدِ الربِّ كان لا يزال مهيمِنًا.

في غضون فترة تقلُّ عن ٥٠٠ عام، استطاع التطبيق الحثيث للمنهج العلمي القائم على الاستدلال من التجربة والملاحظة، دون اللجوء إلى أي سلطة دينية أو حكومية؛ أن يغيِّر بالكامل من نظرتنا لأصولنا وعلاقتنا بالكون. وبالإضافة إلى ما اتسمت به النظرة الجديدة التي أتاحها العلم من إبهار حقيقي، فقد كان لهذه النظرة كذلك أثرٌ ضخم على كلٍّ من الفلسفة والدِّين؛ فالنتائج التي توصَّل إليها العلم تقضي ضمنًا بأن البشر نتاجٌ لقُوًى موضوعية، وأن العالَم القابل للسُّكْنَى يُشكِّل جزءًا ضئيلًا من كونٍ عظيم الحجم وطويل الأمد. وبغضِّ النظر عن المعتقدات الدينية أو الفلسفية لأفراد العلماء، فإن برنامج البحث العلمي بأسْره مبنيٌّ على افتراض أن الكون يمكن فهمه على مثل هذا الأساس.

لن يماري في نجاح هذا البرنامج إلا قليلون، خاصة في القرن العشرين، الذي شهد أحداثًا بشعة في الشأن البشري. إن تأثير العلم ربما يكون قد أسهم على نحو غير مباشر في تلك الأحداث، وهو ما حدث جزئيًّا بفعل التغيُّرات الاجتماعية التي أوجدها ظهور المجتمعات الصناعية الكبرى، وجزئيًّا بفعل تقويض منظومات المعتقدات التقليدية. ومع هذا، يمكن الزعم أنه كان بالإمكان تجنُّب قدْر كبير من المُعاناة على مدار تاريخ البشر عن طريق الاحتكام إلى العقل، وأن كوارث القرن الحادي والعشرين إنما نتجتْ عن فشَلِنا في

التصرف بعقلانية، لا عن فشل العقلانية نفسها. ويظل الأمل الوحيد لمستقبل البشرية هو التطبيق الحكيم للفهم العلمي على العالم الذي نعيش فيه.

تكشف دراسة التطور عن علاقاتنا الوثيقة بالأنواع الأخرى التي تقطن كوكب الأرض، وإذا أردْنا تجنُّب كارثة عالمية، فمِن الضروري أن تُحتَرَم هذه العلاقات. يهدف هذا الكتاب إلى تعريف القارئ العادي ببعضٍ من أهم النتائج والمفاهيم والمناهج الأساسية لعلم الأحياء التطوري، عبر رحلة تطوُّره منذ المنشورات الأولى لداروين ووالاس عن الموضوع منذ أكثر من ١٤٠ عامًا مضت. يقدِّم التطور مجموعة من المبادئ الموحِّدة لعلم الأحياء بالكامل، كما أنه يُلقِي الضوء على العلاقة بين البشر والكون، وبين البشر بعضِهم وبعض. علاوة على ذلك، للعديد من جوانب التطور أهمية عملية، ومثال على ذلك المشكلات المُلِحَّة التي يفرضها التطور السريع لمقاومة البكتيريا للمضاداتِ الحيويةَ، ومقاومة فيروسِ العوز المناعي البشري (إتش آي في) العقاقيرَ المضادة للفيروسات.

في هذا الكتاب سنستعرض أولًا العمليات السببية الرئيسية للتطور (الفصل الثاني). ثم يقدِّم الفصل الثالث قدْرًا من المعرفة البيولوجية الأساسية، ويُبيِّن كيف يمكن فهم أوجه الشَّبَه بين الكائنات الحية من منظور التطور. بعد ذلك يَصِف الفصل الرابع الأدلة المؤيِّدة للتطور والمأخوذة من تاريخ كوكب الأرض، ومن أنماط التوزيع الجغرافي للأنواع الحية. يركِّز الفصل الخامس على تطور أوجه التكيُّف لدى الكائنات عن طريق الانتخاب الطبيعي. بينما يركِّز الفصل السادس على تطور الأنواع الجديدة والاختلافات بين الأنواع. في الفصل السابع سنناقش بعض المشكلات بادية الصعوبة التي تكتنف نظرية التطور، ثم نقدِّم ملخَّصًا موجزًا لما استعرضناه في الفصل الثامن.

الفصل الثاني

# عمليات التطور

من أَجْل فهْمِ الحياة على كوكب الأرض، نحتاج إلى معرفة الكيفية التي تعمل بها أجسام الحيوانات (ومن بينها البشر) والنباتات والميكروبات، وصولًا إلى مستوى العمليات الجزيئية التي يقوم عليها هذا العمل. هذا هو السؤال الخاص بـ «الكيفية» في علم الأحياء، وقد أَنتَج كمٌّ هائل من البحوث على مدار القرن الماضي تقدُّمًا عظيمًا نحو الإجابة على هذا السؤال. وقد بيَّن هذا الجهد أنه حتى أبسط الكائنات القادِرة على الوجود بشكل مستقِلٍّ — الخلية البكتيرية — هي ماكينة ذات تعقيد بالِغ، بها آلاف الجزيئات البروتينية المختلفة التي تعمل على نحو متناسِق فيما بينها من أجْل أداء الوظائف اللازمة لبقاء الخلية، ومِن أجْل انقسامها كي تُنتِج خليتين وليدتين (انظر الفصل الثالث). وهذا التعقيد يَصِير أكبر من هذا في الكائنات الأعلى كالذباب أو البشر؛ فهذه الكائنات تبدأ حياتها على صورة خلية وحيدة، مكوَّنة من خلال اندماج بويضة مع حيوان منوي، وبعد ذلك تحدث سلسلة محكومة على نحو دقيق من عمليات الانقسام الخلوي، مصحوبة بتمايُز الخلايا الناتجة إلى العديد من الأنواع المستقِلَّة. وفي نهاية المطاف تُنتِج عمليةُ النمو الكائنَ البالِغَ، ذا البنية العالية التنظيم المؤلَّفة من مختلف الأنسجة والأعضاء، وذا القدرة على أداء سلوك معقَّد. إن فهمنا للآليات الجزيئية التي يقوم عليها هذا التعقيد في البنية والوظيفة آخِذٌ في التوسُّع بشكل سريع. وبالرغم من أنه لا يزال هناك العديد من المشكلات غير المحلولة، يظل البيولوجيون مقتنعين بأنه حتى أعقد سمات الكائنات الحية، مثل الوعي الإنساني، إنما هي انعكاس لعمل عمليات كيميائية وفيزيائية قابِلة للتحليل العلمي.

وعلى كل المستويات — من بِنْية أيِّ جُزَيْء بروتيني منفرد ووظيفته إلى تنظيم المخ البشري — نرى العديد من الأمثلة على «التكيُّف»؛ ونعني به ملاءمة البِنْية للوظيفة على النحو الذي يَظهَر أيضًا في الماكينات التي يُصمِّمها البشر (انظر الفصل الخامس). كما نرى أيضًا أن الأنواع المختلفة لها خصائص متمايِزة، تَعكِس غالبًا عمليات التكيُّف مع البيئة التي تعيش هذه الأنواع فيها، وهذه الملاحظات تُثِير سؤالَ «لماذا» في علم الأحياء، والمعنيَّ بالعمليات التي تسبَّبت في كون الكائنات على النحو الذي هي عليه. قبل ظهور فكرة التطور، كان من شأن أغلب البيولوجيين أن يُجيبوا على هذا السؤال بالقول بوجود خالِقٍ. استُحدث مصطلح التكيُّف على يَدِ علماء لاهوت في القرن الثامن عشر زعموا أن مَظهَر التصميم في سمات الكائنات الحية يُثبِت وجود قوة غيبية هي التي قامت بعملية التصميم. وبالرغم من أنه تمَّ إثبات خطأ هذا الزعم من الناحية المنطقية على يد الفيلسوف ديفيد هيوم في منتصف القرن الثامن عشر، فإنه ظلَّ مسيطِرًا على أذهان الناس في ظل غياب أي بديل آخَر جدير بالتصديق.

تُقدِّم الأفكار التطورية مجموعةً من العمليات الطبيعية التي يُمكِنها تفسيرُ التنوع الشاسع للأنواع الحية، والخصائص التي تجعلها متكيِّفة بهذه الدرجة الطيِّبة مع بيئاتها، دون اللجوء لحجة التدخل الغيبي. وهذه التفسيرات تمتدُّ، بطبيعة الحال، إلى أصل النوع البشري نفسه، وهذا جعل التطورَ البشري أكثرَ الموضوعات العلمية إثارةً للجدل. لكن إذا تناولنا هذه القضايا دون تحيُّز سابق، فمن الممكن رؤية أن الأدلة المؤيِّدة للتطور بوصفه عملية تاريخية، لا تَقِلُّ قوةً عن تلك المؤيِّدة لنظريات علمية أخرى راسخة منذ وقت بعيد، مثل الطبيعة الذرية للمادة (انظر الفصلين الثالث والرابع). لدينا أيضًا مجموعة من الأفكار المُتحقَّق منها جيدًا بشأن مسبِّبات التطور، وإن كان هذا لا يمنع — كما هو الحال في أي فرع علمي مَتِين — وجودَ مشكلات مستعصية على الحلِّ، إضافةً إلى ظهور أسئلة جديدة مع تزايُد فَهْمنا (انظر الفصل السابع).

يتضمن التطور البيولوجي تغيُّرات تحدث على مرِّ الزمن في خصائص تجمعات الكائنات الحية، ويتفاوت النطاق الزمني لهذه التغيرات ومقدارها تفاوتًا ضخمًا. من الممكن دراسة التطور خلال فترة حياة شخص، حين تحدث تغيرات بسيطة في سِمَة منفردة، كما هو الحال عند زيادة معدل السلالات البكتيرية المقاوِمة للبنسيلين، في غضون سنوات قليلة تالية على الاستخدام الواسع الانتشار للبنسيلين في السيطرة على العدوى البكتيرية (وهو ما سنناقشه في الفصل الخامس). على طرف النقيض، يتضمن التطور

أحداثًا مثل ظهور تصميم رئيسي جديد للكائنات، وهو ما قد يستغرق ملايين السنوات ويتطلب تغيرات في العديد من الخصائص المختلفة، كما في الانتقال من الزواحف إلى الثدييات (انظر الفصل الرابع). من الأفكار المحورية لمؤسِّسَيِ النظرية التطورية، تشارلز داروين وألفريد راسل والاس، فكرةُ أن التغيُّرات على كل المستويات من المرجَّح أن تتضمن الأنواع نفسها من العمليات. والتحولات التطورية الكبيرة تعكس بدرجة كبيرة النوعَ ذاته من التغيرات التي تعكسها الأحداث الصغيرة المتراكِمة على امتداد فترات زمنية أطول (انظر الفصلين السادس والسابع).

في النهاية يعتمد التغيُّر التطوري على ظهور أشكال متنوعة جديدة من الكائنات؛ أي «طَفَرات»، وهذه الطفرات تسبِّبها تغيُّرات مستمرة في المادة الوراثية، المنقولة من الوالدين إلى الأبناء. إن الطفرات التي تؤثِّر على جميع الخصائص الممكِنة في العديد من الكائنات المختلفة قد خضعت للدراسة في المختبر على يد علماء الوراثة التجريبيين، وصنَّف علماء الوراثة الطبية آلاف الطفرات في التجمعات السكانية البشرية. إن تأثيرات الطفرات على الخصائص القابلة للرصد للكائن تتباين بشدة من حيث قوتها؛ فبعض الطفرات ليس لها تأثير قابل للرصد، ومن المعروف أنها توجد فقط لأنه صار من الممكن الآن دراسة بنية المادة الوراثية مباشَرةً، كما سنصف في الفصل الثالث. لطفرات أخرى تأثيرات صغيرة نسبيًّا على سمة بسيطة، مثل تغيير لون العين من البني إلى الأزرق، أو اكتساب أحد أنواع البكتيريا مناعةً ضد المضادات الحيوية، أو تغيير عدد الشعيرات على جانب ذبابة الفاكهة. ولبعض الطفرات تأثيرات بالغة على النمو، مثل الطفرة التي تصيب ذبابة الفاكهة السوداء البطن، «دروسوفيلا ميلانوجاستر»، التي تُسبِّب نمو ساق في رأس الذبابة في مكان قرن الاستشعار. إن ظهور أي طفرة جديدة من نوع خاص لَهُو حَدَثٌ نادر للغاية، يَصِل معدَّل حدوثه إلى واحد في كل مائة ألف فرد لكل جيل، أو حتى أقلَّ من ذلك، وأي تغيير في حالة الصفة نتيجةً لطفرة — مثل مقاومة المضادات الحيوية — يحدث في البداية في فرد واحد، وعادةً ما يكون مقصورًا على نسبة صغيرة من تجمع تقليدي لأجيال عديدة. وكي تتسبب الطفرة في تغير ثوري، لا بد أن تتسبب عمليات أخرى في جعلها تزداد تواترًا داخل ذلك التجمع.

يُعَدُّ «الانتخاب الطبيعي» أهم عمليات التغيرات التطورية التي تؤثِّر على بنية الكائنات ووظيفتها وسلوكها (انظر الفصل الخامس). عرض داروين ووالاس في أوراقهما

البحثية المنشورة عام ١٨٥٨ في «دورية وقائع الجمعية اللينية»؛ نظريتَهما الخاصة بالتطور عن طريق الانتخاب الطبيعي مستعينَيْن بالحجة التالية:

- يولد من أفراد أي نوع عدد أكبر من ذلك الذي يستطيع العيش في المعتاد حتى سِنِّ النضج والتكاثُر بنجاح؛ ومِن ثَمَّ يوجد «صراع من أجْل البقاء».
- هناك «تنوع فردي» في عدد لا يُحصَى من خصائص التجمع، والبعض منه قد يؤثِّر على قدْرة الفرد على البقاء والتكاثر؛ ومِن ثَمَّ فإن الوالِد الناجح لأي جِيل قد يتباين عن التجمع ككل.
- من المرجَّح وجود «مكوِّن وراثي» في غالبية هذا التنوع؛ بحيث إن خصائص نسل أي والد ناجح ستختلف عن خصائص الجيل السابق، على نحو مشابه لما حدث مع والده.

إذا استمرت هذه العملية من جيل إلى آخر، فسيحدث تحوُّل تدريجي للتجمع، بحيث تتزايد مع مرور الوقت معدلاتُ وجود الصفات المرتبطة بالقُدْرة الأكبر على البقاء أو التكاثر بنجاح. هذه الخصائص المعدَّلة نشأتْ بفعل طفرات، لكن الطفرات التي تؤثِّر على أي سمة بعينها تَظهَر طوال الوقت، بغضِّ النظر هل كان الانتخاب يستحسنها أم لا. وفي الواقع، أغلب الطفرات إمَّا لا يكون لها تأثير على الكائن، وإما تُقلِّل من قدرته على البقاء أو التكاثر.

إن عملية زيادة تواتر التنويعات التي تُحسِّن القدرة على البقاء أو التكاثر بنجاح هي التي تفسِّر تطور الخصائص التكيفية؛ وذلك لأن الأداء الأفضل لجسم الفرد أو سلوكه سيُسهِم عمومًا في المزيد من النجاح في كلٍّ من عمليتي البقاء والتكاثر. وستكون عملية التغير هذه مرجحة بشكل خاص لو كان التجمع معرضًا لبيئة متغيِّرة، تُستحسَن فيها مجموعة من الخصائص مختلفة عن تلك التي أرساها الانتخاب بالفعل. وقد كتب داروين عام ١٨٥٨ يقول:

> بفرض أن الظروف الخارجية لبلد ما تتغير … الآن، هل يمكن أن يكون هناك أي شك، من واقع الصراع الذي سيخوضه كل فرد من أجْل تأمين معيشته، في أن أي تغيير طفيف في البنية أو العادات أو الغرائز — من شأنه أن يكيِّف ذلك الفرد بشكل أفضل مع الظروف الجديدة — سيؤثِّر على قوته وصحته؟ في هذا الصراع ستكون لديه «فرصة» أفضل للبقاء، وكذلك سيتمتع من سلالته هؤلاء

الذين يرثون هذا التغيير، مهما كان طفيفًا، بفرصة أفضل للبقاء. سنويًّا، يفوق عددُ المواليد عددَ القادرين على البقاء، وسيكون حتميًّا لأهون ذرة رمل موضوعة في الميزان أن تحدد، على المدى البعيد، مَن سيُصيبه الموت، ومَن ستُكتب له الحياة. ولنفترض استمرار عمل الانتخاب هذا من ناحية، والموت من ناحية أخرى، لآلاف الأجيال، فمَن له أن يتظاهر بالتأكيد على أن هذا لن يكون له أي أثر؟ …

لكن هناك آلية أخرى مُهِمَّة للتغير التطوري تُفسِّر الكيفية التي يمكن بها أن يتغيَّر النوع من حيث السمات التي لها تأثير طفيف — أو ليس لها تأثير على الإطلاق — على بقاء مالكها أو نجاحه التكاثري، والتي تكون بالتبعية غير خاضعة للانتخاب الطبيعي. كما سنرى في الفصل السادس، من المرجَّح أن يصحَّ هذا في حالة الفئة الكبيرة من التغيرات في المادة الوراثية التي ليس لها سوى تأثير طفيف — أو ليس لها تأثير على الإطلاق — على بنية الكائن أو أدائه الوظيفي. فإذا كان هناك تغيُّر «مُحايِد من المنظور الانتخابي»؛ بحيث إنه في المتوسط لا يوجد أي اختلافات في البقاء أو الخصوبة بين شتَّى أفراد النوع، لا يزال من الممكن لجيل الأبناء أن يختلف على نحو طفيف عن جيل الآباء؛ سبب هذا هو أنه في غياب الانتخاب الطبيعي، تكون الجينات الموجودة في تجمع الأبناء بمنزلة عينة عشوائية للجينات الموجودة في التجمع الأبوي. التجمعات الحقيقية محدودة الحجم؛ ومِن ثَمَّ سيختلف تركيب تجمع الأبناء بفعل المصادفة عن ذلك الخاص بجيل الآباء بدرجة ما، تمامًا مثلما لا نتوقع الحصول على الصورة خمس مرات والكتابة خمس مرات بالضبط عند إلْقاء عملة عشر مرات. يُطلَق على عملية التغير العشوائي هذه «الانحراف الوراثي». وحتى أكبر التجمعات البيولوجية، كتلك الخاصة بالبكتيريا، محدودةُ العَدَد؛ ومِن ثَمَّ سيؤدِّي الانحراف الوراثي عمله على الدوام.

إن التأثيرات المجتمعة لكلٍّ من الطفرات والانتخاب الطبيعي وعملية الانحراف الوراثي العشوائية، تسبِّب تغيرات في تركيبة أيِّ تجمع. وعلى مدار فترة طويلة بما يكفي من الوقت، تغيِّر هذه التأثيراتُ التراكمية التركيبَ الوراثي للتجمُّع، ويمكنها بالتبعية أن تغيِّر على نحوٍ عظيم من خصائص النوع مقارَنةً بأسلافه.

أشرْنا سابقًا إلى تنوع الحياة، المنعكس في العدد الكبير من الأنواع الحيةِ اليومَ. (كان عدد الأنواع الموجودة على امتداد تاريخ الحياة في الماضي أكبر بكثير، وهو ما يرجع

إلى حقيقة أن المصير النهائي لكل الأنواع تقريبًا هو الانقراض، وهو ما سنتحدَّث عنه في الفصل الرابع.) من الواضح أن مشكلة الكيفية التي تتطور بها أنواع جديدة مشكلة محورية، وسوف نتناولها بالنقاش في الفصل السادس. إن مصطلح «النوع» صعب التعريف، ومن الصعب أحيانًا أن نرسم خطًّا واضحًا بين التجمعات المنتمية إلى النوع نفسه، والتجمعات التي تنتمي إلى نوع منفصل. عند التفكير بشأن التطور، من المنطقي أن ننظر إلى تجمعين من الكائنات المتكاثرة جنسيًّا بوصفهما نوعين منفصلين، إذا كانا يعجزان عن التزاوج أحدهما بالآخر، بحيث يكون مصيراهما التطوريان مستقلَّيْن بالكامل. وعلى هذا، فإن التجمعات البشرية التي تعيش في أجزاء أخرى من العالم تنتمي صراحةً إلى النوع نفسه؛ نظرًا لعدم وجود حواجز تُعِيق التناسل إذا حدث أنْ هاجَر أحد الأفراد من مكان لآخر. وهذه الهجرة تَمِيل إلى منع التركيب الوراثي للتجمعات المختلفة للنوع نفسه من التشعب بدرجة أكبر مما ينبغي. على النقيض من ذلك، من الواضح أن الشمبانزي والبشر نوعان منفصلان تمامًا؛ نظرًا لأن البشر والشمبانزي اللذين يعيشان في المكان عينه يستحيل التناسل بينهما. وكما سنصف في موضع لاحق، يختلف البشر عن الشمبانزي من حيث تركيبة مادتهما الوراثية بدرجة أكبر بكثير من اختلاف بعض أفراد أحدهما عن بعضه الآخَر. إن تكوين نوع جديد يجب أن يتضمَّنَ تطوُّرَ حواجزَ تمنع التزاوج بين التجمعات ذات الصلة، وما إنْ تتكون مثل هذه الحواجز حتى تستطيع التجمعاتُ التشعُّبَ بفعل الطفرات والانتخاب الطبيعي والانحراف الوراثي. وفي نهاية المطاف تؤدِّي عمليةُ التشعُّب، لا محالة، إلى تنوُّع الحياة، وإذا تفهَّمنا كيفيةَ تطور حواجز التناسل، والكيفية التي تتشعب بها التجمعات في النهاية، فسنفهم أصل الأنواع.

يصير قَدْر كبير من المعطيات البيولوجية مفهومًا في ضوء هذه الأفكار الخاصة بالتطور، التي وُضِعت على أساس راسخ من خلال وضع نظريات رياضية يمكن نمذجتها تفصيلًا، تمامًا مثلما يُنَمذِج علماء الفلك والفيزيائيون سلوك النجوم والكواكب والجزيئات والذرات من أجْل فهمها على نحو أكثر اكتمالًا، ومِن أجْل تصميم اختبارات مفصَّلة لنظرياتهم. وقبل وصْف آليات التطور بمزيد من التفصيل (لكن مع حذف التفاصيل الرياضية)، سيوضح الفصلان التاليان الملاحظات البيولوجية العديدة التي تصير منطقية في ضوء التطور، على النقيض من فكرة الخلق الخاص والْتجائها للتفسيرات المؤقَّتة.

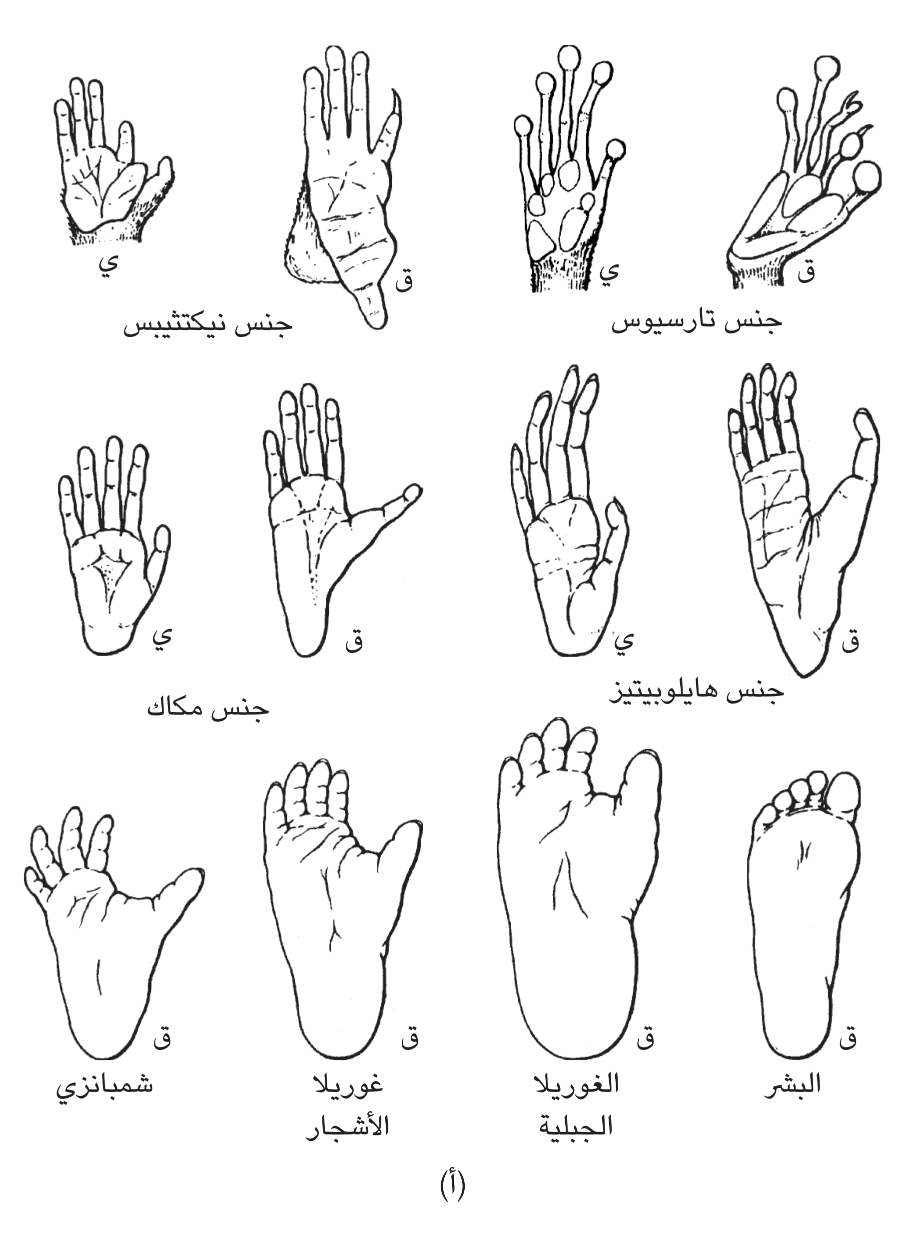
الفصل الثالث

# الأدلة المؤيِّدة للتطور: أوجه الشبه والاختلاف بين الكائنات

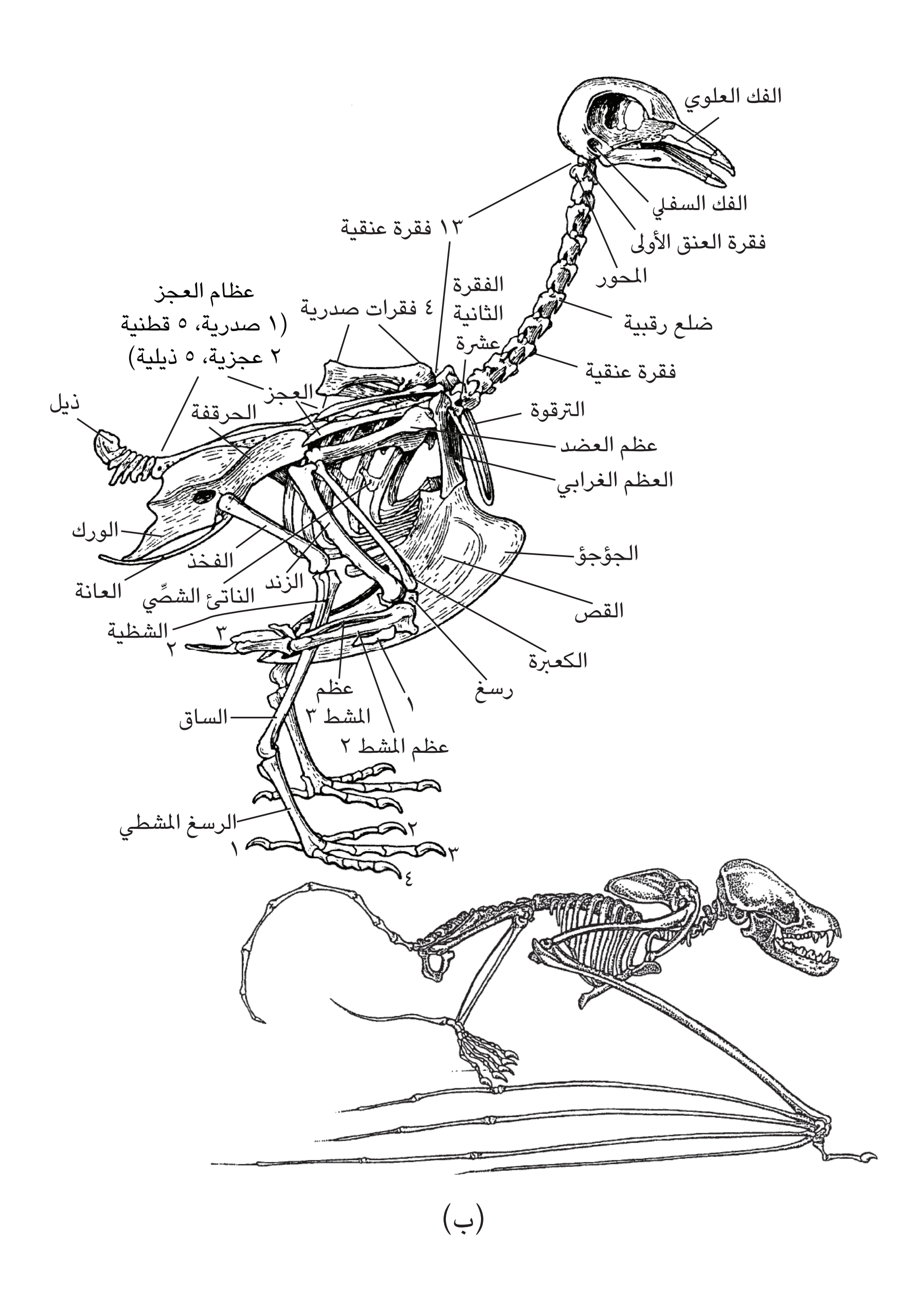
تفسِّر نظريةُ التطور تنوُّعَ الحياة، بكل الاختلافات المعروفة جيدًا بين أنواع الحيوانات والنباتات والميكروبات المختلفة، كما أنها تفسِّر أيضًا أوجُه الشَّبَه الأساسية بين هذه الكائنات؛ وأوجه الشبه هذه تكون في المعتاد جَلِيَّة عند المستوى السطحي للسمات المرئية من الخارج، ولكنها أيضًا تمتدُّ إلى أدقِّ تفاصيل البِنْية الميكروسكوبية والوظائف البيوكيميائية. سوف نناقش تنوع الحياة في موضع لاحِق (في الفصل السادس)، ونَصِف الكيفية التي تفسِّر بها نظريةُ التطور ظهورَ الأشكال الجديدة من أسلافها القديمة، لكننا سنركِّز هنا على وَحْدة الأنواع الحية. علاوةً على ذلك، سنستعرض العديدَ من الحقائق البيولوجية الأساسية التي ستُبنَى عليها الفصول اللاحقة.

## أوجه الشَّبَه بين مجموعات الأنواع المختلفة

توجد أوجه شبه — حتى بين الأنواع المتباينة تبايُنًا واسعًا — على كل مستوًى، بدايةً من التشابهات المرئية من الخارج، ووصولًا إلى التشابهات العميقة في دورات الحياة وتركيب المادة الوراثية. وهذه التشابهات قابلة للرَّصْد، لا شك، حتى بين أنواع يختلف بعضها عن بعض اختلافَ البشر عن البكتيريا. وهذه التشابهات لها تفسير طبيعي مُباشِر يتمثَّل في فكرة أن الكائنات مرتبطٌ بعضُها ببعض عن طريق عمليةِ انحدارٍ تطورية من أسلاف مشتركين. والبشر أنفسهم تجمعهم أوجه شبه بالقِرَدة العُلْيا، كما هو موضَّح في الشكل ٣-١أ، بما فيها أوجه شبه في السمات الداخلية مثل بنية أدمغتنا وتنظيمها. تجمعنا أوجه شبه أقل مع السعادين، وأوجه أقل — وإن كانت واضحة




شكل ٣-١: (أ) رسم توضيحي لأيدي (ي) وأقدامِ (ق) عددٍ من أنواع الرئيسيات، يبيِّن أوجهَ الشبه بين الأنواع المختلفة، مع ارتباط الاختلافات بطريقة معيشة الحيوان، مثل الأصابع المتعاكسة للأنواع المتسلِّقة (مثال: جنس هايلوبيتيز هو قرد جيبون، والمكاك هو المكاك الريصي، أما جنسا نيكتثيبس وتارسيوس فهما رئيسيات شجرية بدائية). (ب) رسم توضيحي لهيكلين عظميين لخفاش وطائر، يُبيِّن أوجهَ الشَّبَه والاختلاف بينهما.



الفك العلوي
الفك السفلي
فقرة العنق الأولى
المحور
١٣ فقرة عنقية
الفقرة
الثانية
عشرة
ضلع رقبية
فقرة عنقية
عظام العجز
(١ صدرية، ٥ قطنية
٢ عجزية، ٥ ذيلية)
٤ فقرات صدرية
العجز
ذيل
الحرقفة
الترقوة
عظم العضد
العظم الغرابي
الورك
الفخذ
العانة
الناتئ الشصِّي
الزند
الجؤجؤ
القص
الشظية
٣
٢
الكعبرة
رسغ
عظم
المشط ٣
١
عظم المشط ٢
الساق
الرسغ المشطي
٢
١
٣
٤


(ب)

للغاية — مع الثدييات الأخرى، بالرغم من كل ما يوجد بيننا وبينها من اختلافات. تجمع أوجهُ شبهٍ عدة بين الثدييات وبين الفقاريات الأخرى، بما في ذلك الملامح الأساسية لأعمدتها الفقرية، وأجهزتها الهضمية والدورية والعصبية؛ بل إنَّ الأكثرَ إدهاشًا من ذلك التشابهاتُ الموجودة بين الثدييات وكائنات مثل الحشرات، مثل بنية أجسامها المقسَّمة والحاجة المشتركة للنوم، والتحكم في إيقاعات النوم والاستيقاظ اليومية، والتشابهات الأساسية في الكيفية التي تعمل بها الأعصاب في أنواع الحيوانات المختلفة، خلاف ملامح أخرى.

لطالما بُنِيت أنظمةُ التصنيف البيولوجي على الخصائص البنيوية المرئية بسهولة؛ فعلى سبيل المثال، وحتى قبل الدراسة العلمية للأحياء: كانت الحشراتُ تُعامَل بوَصْفها مجموعةً من الكائنات المتشابهة، وكانت قابلة للتميز على نحو واضح عن المجموعات الأخرى من اللافقاريات، مثل الرخويات، من خلال امتلاكها جسمًا مقسمًا، وستة أزواج من الأرجل المفصلية، وغطاءً واقيًا خارجيًّا صلبًا، وغيرها من الخصائص. تتقاسم الحشراتُ العديدَ من هذه السمات مع أنواع أخرى من الحيوانات مثل الكابوريا والعناكب، إلَّا أن عدد الأرجل قد يتبايَن (ثماني أرجل في حالة العناكب). هذه الأنواع المختلفة كلها مُجمَّعة في شعبة واحدة كبيرة، هي شعبة المفصليات. تتضمن المفصلياتُ الحشراتِ، وضمن الحشرات يشكِّل الذباب مجموعة منفصلة تتميز بحقيقة أنها تملك زوجًا واحدًا من الأجنحة، علاوة على العديد من السمات الأخرى المشتركة. تشكل الفراشات والعُثَث مجموعةً أخرى من مجموعات الحشرات، يملك أفرادُها جميعًا حراشفَ دقيقةً على زوجَيِ الأجنحة اللذين تملكهما. ومن بين الذباب نميِّز الذبابة المنزلية وقريباتها من المجموعات الأخرى عن طريق سمات مشتركة، ومن بين هذه نُسمِّي «الأنواع» الفردية، مثل الذبابة المنزلية الشائعة «موسكا دومستيكا». الأنواع بالأساس هي مجموعات من أفراد متشابهين قادرين على التناسل فيما بينهم، وتُجمَّع الأنواعُ المتشابهة في «الجنس» ذاته، وهي مجموعة يربط بين أفرادها سماتٌ لا تشاركها معها الأجناسُ الأخرى. يعرِّف علماء الأحياء كل نوع قابل للتمييز بِاسْمَيْن؛ اسم الجنس متبوعًا باسم النوع نفسه، مثل الإنسان العاقل أو «هومو سابينز»؛ فكلمة هومو هي اسم الجنس، وسابينز هو النوع.

مثلت الملاحظة التي تقضي بأنه يمكننا تصنيف الكائنات هرميًّا إلى مجموعات — تتشارك على نحو متزايد في المزيد والمزيد من السمات التي تفتقر إليها مجموعات أخرى — تقدُّمًا مُهمًّا في علم الأحياء. وقد تطورت عملية تصنيف الكائنات إلى أنواع، ومنظومة

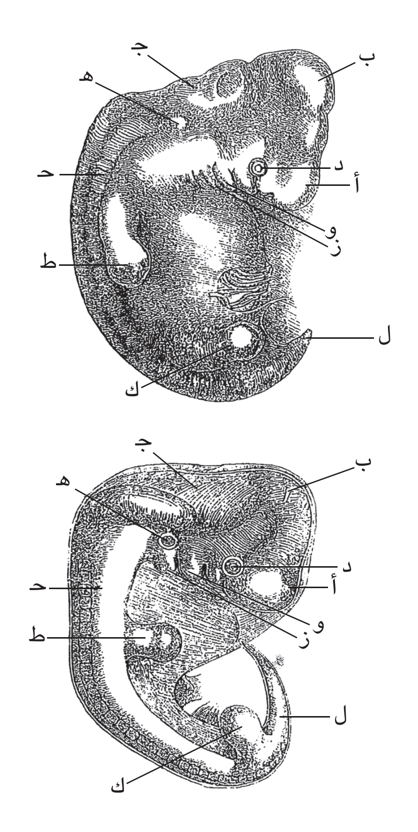
التسمية الخاصة بالأسماء، قبل داروين بوقت طويل؛ فقبْلَ أن يَبدَأ علماء الأحياء التفكير في تطور الأنواع، كان من المهم على نحو واضح أن يكون لديهم مفهوم الأنواع بوصفها كيانات متمايزة. والسبيل الأبسط والأكثر طبيعيةً لتفسير النمط الهرمي للتشابهات هو أن الكائنات الحية تطورت على مرِّ الزمن، بدايةً من أشكال قديمة تمايزت كي تنتج المجموعات الموجودة على قيد الحياة اليومَ، علاوةً على عدد لا يُحصى من الكائنات المنقرضة (انظر الفصل الرابع). وكما سنناقش في الفصل السادس، من الممكن الآن تبيُّن هذا النمط المستدلِّ عليه لعلاقات النَّسَب بين مجموعات الكائنات، عن طريق الدراسة المباشرة للمعلومات الموجودة في مادتها الوراثية.

ثمة مجموعة أخرى من الحقائق تدعم بقوة نظرية التطور، وهي تأتينا من التعديلات التي نجدها في البنية ذاتها داخل الأنواع المختلفة؛ على سبيل المثال: تُشير عظام أجنحة الخفافيش والطيور بوضوح إلى أنها أطراف أمامية معدَّلة، بالرغم من أنها تبدو مختلفة للغاية عن الأطراف الأمامية للفقاريات الأخرى (الشكل ٣-١ب). وبالمِثْل، بالرغم من أن زعانف الحيتان تبدو مشابهة للغاية لزعانف الأسماك، ومن الواضح أنها مكيَّفة بحيث تلائم السباحة، فإن بِنْيَتها الداخلية تُشبِه أقدام الثدييات الأخرى، باستثناء وجود عدد أكبر من الأصابع. هذا أمر منطقي، في ضوء الأدِلَّة الأُخرى التي تُشِير إلى أن الحيتان ثدييات معدَّلة (على سبيل المثال: تتنفس الحيتان باستخدام الرئة وتُرضِع صغارَها). تُبيِّن الأدلة المأخوذة من الحفريات أن زوجَيِ الأطراف للفقاريات الأرضية منحدران من زوجَيِ الزعانف الخاصة بالأسماك اللَّحْمِيَّات الزعانف (التي تُعدُّ شوكياتُ الجوف أشهرَ أمثلتها الحية، انظر الفصل الرابع). في الواقع، كان لدى أقدم أنواع الفقاريات الأرضية أكثر من خمسة أصابع في كل طرف من أطرافها، تمامًا كالأسماك والحيتان. مثال آخَر: العظامُ الصغيرة الثلاث الموجودة في آذان الثدييات، التي تنقل الصوتَ من الخارج إلى العضو المسئول عن تحويل الصوت إلى إشارات عصبية؛ هذه العظام الصغيرة تتطوَّر من أعضاء بدائية في فك وجمجمة الجنين، وفي الزواحف تتضخَّم هذه العظام خلال مرحلة النمو كي تؤلِّف أجزاءً من هيكل الرأس والفك، وتُظهِر الحفرياتُ الوسيطة التي تربط الزواحفَ بالثدييات وجودَ تعديلات متتالية لهذه العظام لدى البالغين، والتي تتطوَّر في النهاية إلى عظام أُذُن. هذه أمثلة قليلة فحسب للعديد من الحالات المعروفة التي خضعتْ فيها البنيةُ الأساسية ذاتها لتعديل بالِغ على مدار تطوُّرها، مدفوعةً بالمطالب التي تفرضها الوظائفُ المختلفة.

## النمو الجنيني والأعضاء اللاوظيفية

يقدِّم النمو الجنيني العديدَ من الأمثلة البارزة الأخرى على التشابهات بين مجموعات الكائنات المختلفة، التي تُشِير بوضوح إلى الانحدار من سلف مشترك. إن الأشكال الجنينية للأنواع المختلفة تكون في المعتاد متشابهة بدرجة كبيرة، حتى حين تكون الأنواع البالغة مختلفة للغاية؛ على سبيل المثال: في إحدى مراحل نمو الثدييات، تَظهَر شقوق خيشومية تشبه تلك الموجودة في أجنة الأسماك (الشكل ٣-٢)، وهذا أمر منطقي للغاية لو أننا ننحدر من أسلاف تشبه الأسماك، بَيْدَ أنه يصير أمرًا مستحيلَ التفسير لو كان الحال غير ذلك. وبما أن البِنَى البالِغة هي التي تكيِّف الكائن مع بيئته، فمن المرجَّح بدرجة كبيرة أن تخضع للتعديل بواسطة الانتخاب. من المرجَّح أن تتطلب الأوعية الدموية النامية وجود شقوق خيشومية كي ترشدها للتكوُّن في المواضع الصحيحة، بحيث يتم الاحتفاظ بهذه البِنَى، حتى في الحيوانات التي لا تملك خياشيمَ عامِلةً؛ ومع ذلك، يمكن لعملية النمو أن تتطور. وفي العديد من التفاصيل الأخرى، تنمو الثدييات على نحو مختلف للغاية عن الأسماك، وهو ما جعل بِنًى جنينية أخرى — تحمل أهميةً أقلَّ في عملية النمو — تختفي، وسبَّبَ اكتسابَ بنًى أخرى جديدةٍ محلَّها.

ليست أوجه الشبه مقصورة على المراحل الجنينية فحسب، فلقد تنبَّهنا منذ زمن إلى أن «الأعضاء اللاوظيفية» ما هي إلا بقايا لبِنًى كانت عامِلة في أسلاف الكائنات الموجودة حاليًّا. إن تطوُّرها مُثِير للاهتمام كثيرًا، لأن هذه الحالات يُمكِنها أن تُخبِرنا بأن التطور لا يَخلق دومًا بنًى جديدة أو يُحسِّنها، وإنما في بعض الأحيان يختزلها. ومن الأمثلة المعروفة لذلك الأمرِ الزائدةُ الدودية لدى الإنسان، التي هي نسخة مختزلة من جزء كبير الحجم من القناة الهضمية لدى قِرَدة الأورانج أوتان. أيضًا الأطراف اللاوظيفية لدى الكائنات عديمة الأرجل معروفة بدرجة كبيرة، وقد عُثِر على حفريات لثعابين بدائية لها أطراف خلفية كاملة تقريبًا، وهو ما يُشِير إلى أن الثعابين تطورت من أسلاف أشبه بالسحالي تملك أرجلًا. يتكون جسد الثعبان في وقتنا الحالي من صدر مستطيل، به عدد كبير من الفقرات (أكثر من ٣٠٠ لدى ثعبان البايثون). في البايثون، الانتقال من الجسم إلى الذيل يميِّزه فقرات ليس بها أضلاع، وفي هذا الموضع يمكن العثور على بقايا الأطراف الخلفية. يوجد حزام حوضي وزوج من عظام الفخذ الضامرة التي يتبع نموها المسار الطبيعي في الفقاريات الأخرى، مع ظهور لنفس الجينات التي تتحكم في المعتاد في نمو الأطراف. ويمكن تطعيم جناح فرخ طائر بنسيج الطرف الخلفي للبايثون من




(أ) الدماغ الأمامي، نصفا الكرة المخيان، الصوار الأمامي.
(ب) الدماغ الأوسط، الأجسام الرباعية التوائم.
(ج) الدماغ الخلفي، المخيخ، النخاع المستطيل.
(د) العين.
(هـ) الأذن.
(و) القوس الحشوي الأول.
(ز) القوس الحشوي الثاني.
(حـ) أعمدة فقارية وعضلات في طور النمو.
(ط) نهايات الأطراف الأمامية.
(ك) نهايات الأطراف الخلفية.
(ل) الذيل أو عظم العصعص.

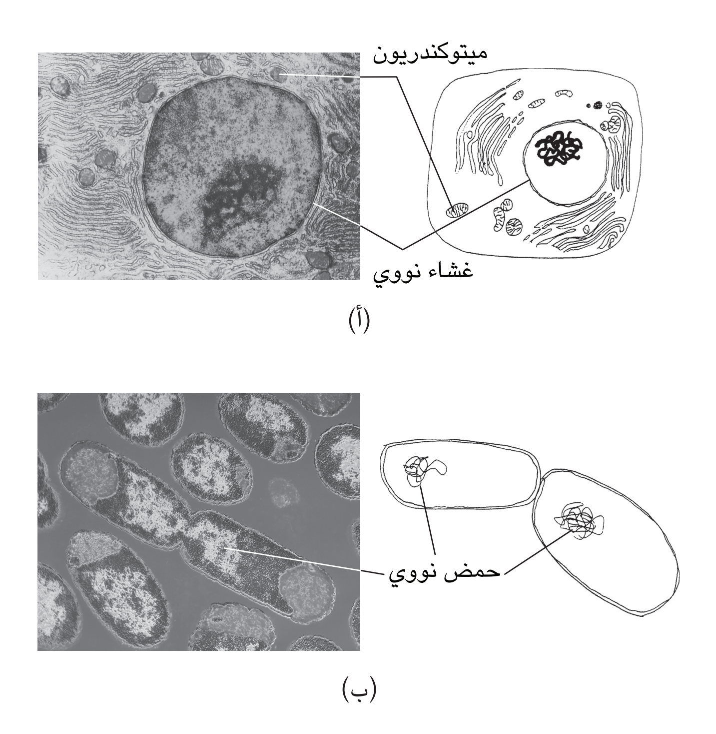
شكل ٣-٢: (الشكل العلوي لجنين بشري، مأخوذ من «إيكر». الشكل السفلي لجنين كلب، مأخوذ من «بيشهوف».) رسم توضيحي لجنين بشري وجنين كلب، يُبيِّن التشابُه الكبير بينهما في هذه المرحلة من النمو. الشقوق الخيشومية المسمَّاة الأقواس الحشوية (و، ز) في الشكل واضحة للغاية. الرسم مأخوذ من كتاب داروين «أصل الإنسان والانتخاب الجنسي» (١٨٧١).

أجْل حثِّه على تكوين إصبع إضافي، وهو ما يُبيِّن أن تلك الأجزاء من منظومة الأطراف الخلفية النمائية لا تزال موجودة في البايثون. أما أنواع الثعابين الأكثر تقدمًا فهي عديمة الأطراف بالكامل.

## التشابه في الخلايا وفي الوظائف الخلوية

ليست أوجه الشبه بين الكائنات مقصورة فقط على الخصائص المرئية؛ فتلك الأوجه عميقة وتمتد حتى أصغر مستوًى ميكروسكوبي، وحتى أكثر جوانب الحياة جوهريةً. من السمات الأساسية لكل الحيوانات والنباتات والفطريات هي أن أنسجة تلك الكائنات تتألَّف بالأساس من الوحدات عينها؛ «الخلايا». إن الخلايا هي العنصر الأساسي في أجسام كل الكائنات خَلَا الفيروسات، بدايةً من الخميرة والبكتيريا الوحيدة الخلية، وانتهاءً بالأجسام العديدة الخلايا ذات الأنسجة المتمايزة كتلك الموجودة في الثدييات. في جميع حقيقيات النوى (ونعني بهذا كل صور الحياة الخلوية غير البكتيرية) تتألَّف الخلايا من «سيتوبلازم» و«نواة» موجودة داخله تحتوي على المادة الوراثية (الشكل ٣-٣)؛ والسيتوبلازم ليس فقط سائلًا موجودًا داخل غشاء الخلية تطفو فيه النواة، بل هو يحتوي على مجموعة معقَّدة من الآلات الدقيقة التي تتضمَّن بنًى دون خلوية، من أهم تلك «العُضيات» الخلوية كلٌّ مِن الميتوكندريات التي تولد طاقة الخلية، وصانعات الكلوروفيل التي تحدث داخلها عملية التمثيل الضوئي في النباتات الخضراء. ومن المعروف الآن أن الاثنين كِلَيهما منحدران من بكتيريا كانت تستعمر الخلايا واندمجت بها لتصير من مكوناتها الأساسية. البكتيريا أيضًا خلايا (الشكل ٣-٣)، لكنها خلايا أبسط ليس بها نواة أو عضيات، ويُطلَق عليها وعلى الكائنات المشابهة اسم «بدائيات النوى». أما الصورة غير الخلوية الوحيدة من صور الحياة — الفيروسات — فهي كائنات طفيلية تتكاثَر داخل خلايا الكائنات الأخرى، وتتكون ببساطة من غلاف بروتيني يُحيط بمادتها الوراثية.

الخلايا مصانع بالغة التعقيد فائقة الصغر تصنِّع المواد الكيميائية التي تحتاجها الكائنات، وتولد الطاقة من مصادر الغذاء، وتنتج بنًى جسمانية مثل عظام الحيوانات. أغلب «الآلات» والعديد من البنى الموجودة داخل تلك المصانع هي «بروتينات». بعض البروتينات عبارة عن «إنزيمات» تأخذ مادة كيميائية وتقوم بأداء مهمة معينة عليها، مثل قص مركَّب كيميائي إلى مكونين منفصلين، وكأنها مقص كيميائي. والإنزيمات



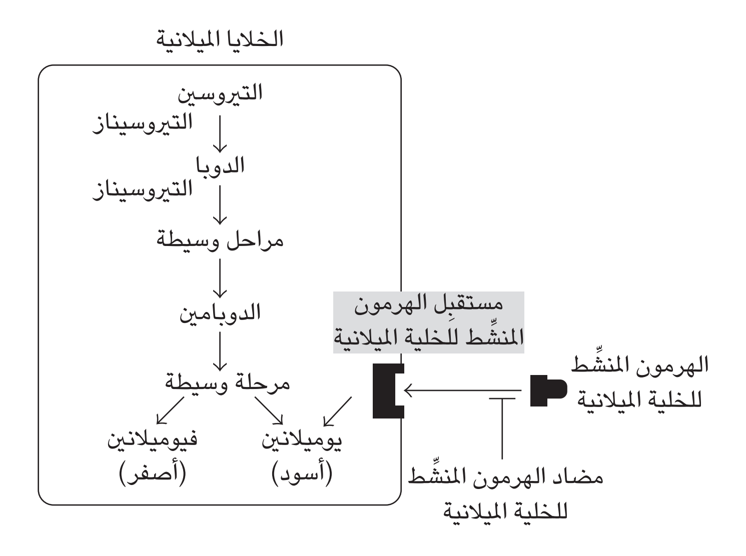

شكل ٣-٣: خلايا الكائنات البدائية النوى والكائنات الحقيقية النوى. (أ) صورة بالميكروسكوب الإلكتروني ورسم يدوي لجزء من خلية مأخوذة من بنكرياس حيوان ثديي، يُبيِّنان النواة المحتوية على الكروموسومات داخل الغشاء النووي، والمنطقة الموجودة خارج النواة والمحتوية على العديد من الميتوكندريات (هذه العضيات أيضًا لها أغشية تحيط بها)، وبنًى شبيهة بالأغشية تشترك في عملية تصنيع البروتينات وتصديرها، علاوة على اشتراكها في استيراد المواد إلى داخل الخلية. الميتوكندريون أصغر بقدر ما من الخلية البكتيرية. (ب) صورة بالميكروسكوب الإلكتروني ورسم يدوي لخلية بكتيرية يبينان بنيتها البسيطة؛ إذ إن لها جدارًا خلويًّا والحمض النووي (دي إن إيه) غير محصور داخل نواة.

المستخدمة في المنظفات البيولوجية تقص البروتينات (كبروتينات الدم والعَرَق) إلى قِطَع أصغر يمكن إزالتها عند غسيل الملابس المتسخة، وتقوم إنزيمات مشابهة في أحشائنا بتكسير الجزيئات الموجودة في الغذاء إلى قِطَع أصغر يمكن للخلايا الاستفادة

منها. البروتينات الأخرى في الكائنات الحية تؤدِّي وظائف تتعلَّق بالتخزين أو النقل؛ فالهيموجلوبين الموجود في خلايا الدم الحمراء يحمل الأكسجين، ويقوم بروتين موجود في الكبد يُدعَى الفيريتين بتثبيت الحديد وتخزينه، وهناك أيضًا بروتينات بِنَوية، كالكيراتين الذي يكوِّن الجِلْد والشعر والأظافر. علاوةً على ذلك، تصنع الخلايا البروتينات التي توصل المعلومات إلى الخلايا الأخرى وإلى الأعضاء الأخرى. الهرمونات بروتيناتُ تواصُلٍ مألوفةٌ تدور في مجرى الدم وتتحكم في العديد من الوظائف الجسمانية، وتوجد بروتينات أخرى على سطح الخلية وتشترك في عملية التواصل مع الخلايا الأخرى. هذه التفاعلات تتضمن إرسالَ إشاراتٍ للتحكُّم في سلوك الخلية خلال النمو، والتواصل بين البويضة والحيوان المنوي في عملية الإخصاب، والتعرف على الطفيليات من جانب الجهاز المناعي.

وكما هو الحال في أي مصنع، تخضع الخلايا لضوابط حاكِمة معقَّدة؛ فهي تستجيب للمعلومات الآتية من الخارج (عن طريق البروتينات التي تفتح غشاء الخلية، كثقوب المفاتيح التي تلائم الجزيئات الآتية من العالم الخارجي. انظر الشكل ٣-٤). تُستخدم بروتينات المستقبلات الحسية، مثل مستقبلات الضوء والمستقبلات الشمِّية، في التواصل بين الخلايا وبيئتها، وتُحوَّل الإشارات الكيميائية وإشارات الضوء الآتية من العالم الخارجي إلى نبضات كهربائية تنتقل على امتداد الأعصاب إلى المخ؛ وجميع الحيوانات التي خضعت للدراسة تستخدم بروتينات متشابهة بدرجة كبيرة في عملية استقبال الضوء والمواد الكيميائية. وكمثال على أوجه الشبه التي اكتُشفت في خلايا الكائنات المختلفة، نجد أن بروتين الميوسين (الحركي)، الشبيه بالبروتينات الموجودة في الخلايا العضلية، يشترك في عملية نقل الإشارات في أعين الذباب وفي آذان البشر، وتتسبَّب الطفراتُ التي تحدث للجين المسئول عن هذا البروتين في إحداث أحد أشكال الصمم.

صنَّف مختصو الكيمياء الحيوية الإنزيماتِ الموجودةَ في الكائنات الحية إلى أنواع متعددة، وكلُّ إنزيم معروف (ويبلغ عددها آلافًا مؤلَّفة في أي كائن معقَّد كالبشر) له رقمٌ في نظامِ ترقيمٍ دولي. ونظرًا لوجود عدد كبير للغاية من الإنزيمات في خلايا نطاقٍ واسعٍ من الكائنات، يصنِّف هذا النظامُ الإنزيماتِ بحسب الوظيفة التي تؤدِّيها، وليس بحسب الكائن الذي أَتَتْ منه. بعض الإنزيمات، كالإنزيمات الهضمية، تقطع الجزيئات إربًا، والبعض الآخر يربطها معًا، فيما تقوم إنزيمات أخرى بأكسدة المواد الكيميائية (أي ربطها بالأكسجين)، وهكذا دواليك.

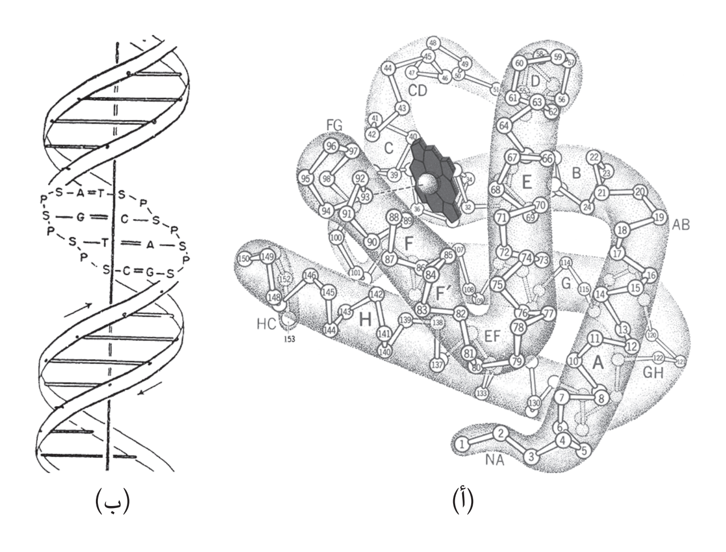



شكل ٣-٤: مسارات تخليقية حيوية يُصنَع من خلالها الميلانين وصبغة صفراء داخل الخلايا الميلانية للثدييات، من طليعة الحمض الأميني الخاص بها؛ التيروسين. كل خطوة في المسار يحفزها إنزيم مختلف، ويؤدِّي غيابُ إنزيم التيروسيناز النَّشِط إلى ولادة حيوان أمهق. يحدِّد مستقبِل الهرمون المنشِّط للخلية الميلانية المقدارَ النسبي من الصبغات السوداء والصفراء، ويؤدِّي غيابُ مضاد الهرمون إلى تصنيع الصبغة السوداء، بينما يجعل وجودُه المستقبِلَ في وضعية «الإغلاق»، وهو ما يؤدي إلى تكوُّن الصبغة الصفراء. هذه هي الكيفية التي تتشكَّل بها الأجزاءُ الصفراء والسوداء من شعر القطط المنزلية والفئران البنية. الطفرات التي تجعل المضاد غيرَ عاملٍ تتسبَّب في لونٍ أكثرَ دكانةً، لكن في المعتاد لا تكون الحيوانات سوداءَ نتيجةَ هذا، وإنما نتيجة ضبْطِ المستقبِل على وضعية «التشغيل» بغضِّ النظر عن مستوى الهرمون.

والطريقة التي تولَّد بها الطاقة بواسطة الخلايا من مصادر الغذاء واحدةٌ تقريبًا في كل أنواع الخلايا. في هذه العملية يوجد مصدر طاقة (سكريات أو دهون في حالة خلايانا، ومركبات أخرى ككبريتيد الهيدروجين في بعض أنواع البكتيريا). وتأخذ الخلية المركب الأوَّلي عبر سلسلة من الخطوات الكيميائية، بعضها يحرِّر طاقة، وهذه «المسارات الأيضية» منظَّمة على نحو أشبه بخط التجميع؛ إذ تحوي تسلسُلًا من العمليات الفرعية،

وكل عملية فرعية تقوم بها «الآلة» البروتينية الخاصة بها. تعمل المسارات نفسُها في نطاق عريض من الكائنات، وتبيِّن الكتبُ الدراسية الحديثة في البيولوجيا المساراتِ الأيضيةَ المُهمَّة دون الحاجة إلى تحديد الكائن الموجودة فيه؛ على سبيل المثال: حين تُرهَق السحالي بعد الجري، فإن هذا الإرهاق يكون ناجمًا عن تراكم حمض اللاكتيك في عضلاتها، مثلما يحدث تمامًا في عضلاتنا. تملك الخلايا مسارات لتصنيعِ مختلفِ أنواع المواد الكيميائية، إضافةً إلى توليد الطاقة من الغذاء؛ على سبيل المثال: بعضٌ من خلايانا يصنع الشعر، وبعضها يصنع العظام، وبعضها يصنع الصبغات، بينما يُنتِج بعضها الآخر الهرمونات ... إلخ. والمسارات الأيضية التي تُصنَع بواسطتها الصبغة الجلدية المعروفة باسم الميلانين (الشكل ٣-٤) هي ذاتها في البشر، والثدييات الأخرى، وفي الفراشات ذات صبغات الأجنحة السوداء، بل حتى في الفطريات أيضًا (كما في الأبواغ السوداء مثلًا)، والعديد من الإنزيمات المشتركة في هذا المسار تُستخدم كذلك بواسطة النباتات في صنع اللجنين، وهو المكوِّن الكيميائي الأساسي للخشب. إن التشابه الجوهري للملامح الأساسية للمسارات الأيضية، من البكتيريا إلى الثدييات، يَصير مفهومًا على الفور في ضوء التطور.

كل بروتين من هذه البروتينات المختلفة المرتبطة بالوظائف الجسمانية والخلوية يتحدد بواسطة أحد جينات الكائن، وهو ما سنشرحه بتفصيل أكبر في موضع لاحق من هذا الفصل. يعتمد عمل كل مسار كيميائي حيوي على الإنزيمات الخاصة به، وإذا فشل أي إنزيم داخل أي مسار في العمل، فلن يخرج المنتج النهائي إلى النور، تمامًا مثلما يؤدي الفشل في إحدى العمليات على خط التجميع إلى توقُّف المنتج النهائي؛ على سبيل المثال: تنتج الطفرات الخاصة بالمَهَق بسبب غياب إنزيم ضروري لإنتاج صبغة الميلانين (الشكل ٣-٤). ويُعَدُّ وقفُ خطوةٍ ما في أحد المسارات وسيلةً مفيدة للسيطرة على ناتج الخلية؛ ولهذا تملك الخلايا مثبِّطات تؤدِّي هذه الوظيفة، كما في حالة التحكم في إنتاج الميلانين. في مثال آخَر، البروتين الذي يكوِّن الجلطات الدموية يوجد في الأنسجة، ولكن في صورة قابلة للذوبان، وتتكون الجلطة فقط عند قَطْع جزء من هذا الجزيء السابق. الإنزيم الذي يقطع هذا البروتين موجود أيضًا، لكنه يكون خاملًا عادةً، وحين تتعرَّض الأوعية الدموية لتَلَف، تُطلَق عواملُ تغيِّرُ من إنزيم التجلُّط، بحيث يصير نَشِطًا على الفور، وهو ما يؤدي إلى تجلُّط البروتين.




شكل ٣-٥: (أ) بنية ثلاثية الأبعاد لبروتين الميوجلوبين (بروتين عضلي شبيه ببروتين خلايا الدم الحمراء الهيموجلوبين)، تظهر الأحماضُ الأمينية المنفردة في سلسلةِ البروتين، مرقَّمة من ١ إلى ١٥٠، وجزيءِ الهيم المحتوي على الحديد الذي يحمله البروتين. يربط الهيمُ الأكسجينَ أو ثاني أكسيد الكربون، ووظيفة البروتين هي حمل هذه الجزيئات الغازية. (ب) بنية الحمض النووي الريبوزي المنقوص الأكسجين (دي إن إيه)، ذلك الجزيء الذي يحمل المادة الوراثية في أغلب الكائنات. يتكوَّن الدي إن إيه من شريطين متكاملين، ملتفٍّ أحدهما حول الآخر على شكل لولب. العمود الفقري لكل شريط يتكون من جزيئات السكر الريبوزي المنقوص الأكسجين (S)، مرتبط بعضها ببعض بواسطة جزيئات فوسفات (P). كل جزيء سكر مرتبط بنوع من الجزيئات يُسمَّى النوكليوتيدات، وهذه النوكليوتيدات تؤلِّف «حروف» الأبجدية الوراثية. هناك أربعة أنواع من النوكليوتيدات، وهي: الأدنين (A)، والجوانين (G)، والسايتوسين (C)، والثايمين (T). ترتبط كل نوكليوتيدة بنوكليوتيدة مكمِّلة لها من الشريط الآخَر، وهي الرابطة المُشار إليها بالخطوط المزدوجة، وقاعدة هذا الارتباط هي أن الأدنين يرتبط بالثايمين، والجوانين يرتبط بالسايتوسين. حين يتضاعف الحمض النووي أثناء عملية الانقسام الخلوي، ينفصم الشريطان، ويتم تكوين شريط وليد مكمل من كل شريط أصلي وفق قاعدة الارتباط هذه؛ وبهذه الطريقة، المكان الذي يرتبط فيه الأدنين بالثايمين في الشريط الأب ينتج مكانًا يرتبط فيه الأدنين بالثايمين في كل جزيء شريط وليد.

البروتينات جزيئات كبيرة للغاية تتألَّف من خيوط تتراوح بين بضعة آلاف وبضع مئات من وحدات «الحمض الأميني» الفرعية، كلٌّ منها يرتبط بحمض أميني مجاوِر، مكوِّنًا سلسلة (الشكل ٣-٥أ). وكلُّ حمض أميني جزيءٌ معقَّد بدرجة كبيرة، وله خصائص كيميائية متفردة وحجم متفرد. يُستخدم عشرون حمضًا أمينيًّا في بروتينات الكائنات الحية، وكلُّ بروتين بعينه — على سبيل المثال: الهيموجلوبين الموجود في خلايا الدم الحمراء الخاصة بنا — يحتوي على مجموعةٍ مميَّزة من الأحماض الأمينية موضوعةٍ في ترتيب محدَّد، وعند وجود الأحماض الأمينية في تتابعها الصحيح، تلْتفُّ سلسلة البروتين على نفسها في شكل بروتين عامل. والبنية المعقدة الثلاثية الأبعاد للبروتين تتحدد بالكامل بواسطة تتابع الأحماض الأمينية في السلسلة أو السلاسل المكوِّنة له، وبدوره يتحدد هذا التتابع بالكامل بواسطة تتابع الوحدات الكيميائية للدي إن إيه (الشكل ٣-٥ب) الخاص بالجين الذي ينتج البروتين، كما سنشرح بعد قليل.

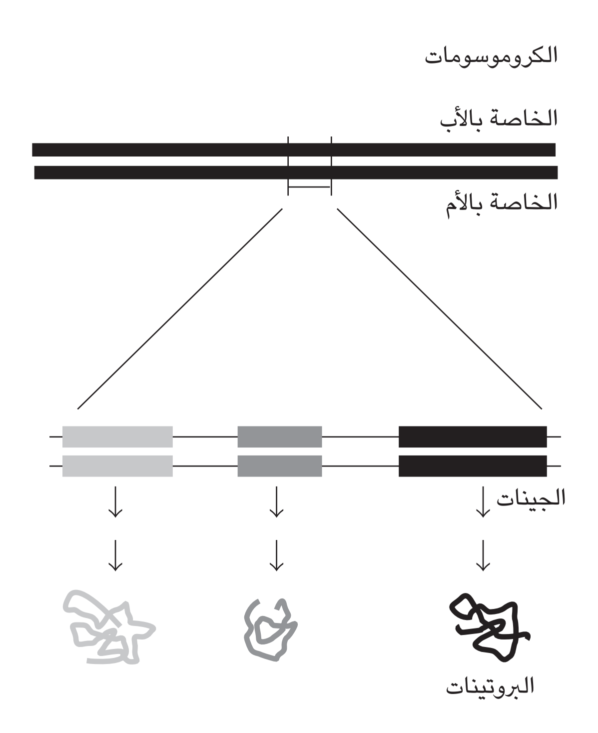
إن الدراسات التي تناولت البنى الثلاثية الأبعاد للإنزيمات أو البروتينات نفسها، في أنواع مختلفة اختلافًا عريضًا؛ تُظهِر أن هذه الإنزيمات أو البروتينات عادةً ما تكون متشابهةً للغاية عبر مسافات تطورية هائلة، كتلك الموجودة بين البكتيريا والثدييات، حتى لو كان تتابع الأحماض الأمينية قد تغيَّر كثيرًا. مثال على ذلك: بروتين الميوسين الذي تحدَّثنا عنه من قبلُ، المشترك في عملية نقل الإشارات في أعيُن الذباب وآذان البشر. هذه التشابهات الجوهرية إنما تعني، على نحوٍ مُثِير للذهول، أنه من الممكن عادةً تصحيحُ عيبٍ أيضي في خلايا الخميرة عن طريق إدخال جين حيواني أو نباتي فيها تكون له الوظيفة عينها؛ فخلايا الخميرة التي بها طفرة تتسبب في عجْزها عن امتصاص النشادر «عُولِجت» عن طريق إدخال جين بشري في خلاياها (الجين المسئول عن بروتين مجموعة الدم الريصي، آر إتش جي إيه، الذي اشتُبِه في أن له وظيفة ذات صلة). إن النسخة الطبيعية (غير المتحوِّرة) لهذا البروتين لدى الخميرة، بها العديد من الاختلافات المتعلقة بالأحماض النووية مقارَنةً بنسخة البشر، ومع ذلك يستطيع الجينُ البشري في هذه التجربة أداءَ وظيفته في خلايا الخميرة التي تفتقر إلى نسخة طبيعية خاصة بها. تخبرنا نتيجة هذه التجربة أيضًا أن أي بروتين به تغيير في تتابع الأحماض الأمينية الخاصة به يستطيع العملَ أحيانًا بشكل طيب.

## الأساس الوراثي واحد لدى الكائنات كافة

إن الأساس المادي للوراثة متشابه على نحو جوهري في جميع الكائنات الحقيقية النوى (الحيوانات والنباتات والفطريات). وفهمنا لآلية الوراثة — ونعني بهذا تحكُّمَ الكيانات المادية، التي نسمِّيها الآن «الجينات»، في الخصائص العديدة المختلفة للأفراد — جاءنا أول ما جاء من دراسة جريجور مندل لنبات البازلاء في حديقته، لكن قواعد الوراثة عينها تنطبق على النباتات الأخرى والحيوانات، بما فيها البشر. إن الجينات التي تتحكم في إنتاج الإنزيمات الأيضية وغيرها من البروتينات (ومِن ثَمَّ تحدد سمات الفرد) هي تتابعات من الدي إن إيه محمولة داخل «الكروموسومات» الموجودة في كل خلية (الشكلان ٣-٦ و٣-٧). وقد اكتشفنا للمرة الأولى أن الكروموسومات تحمل جينات الكائن في تنظيم خطي في ذبابة الفاكهة «دروسوفيلا ميلانوجاستر»، لكن الأمر ينطبق على حد سواء على جينوم البشر أيضًا. من الممكن أن يتغير ترتيب الجينات على الكروموسوم خلال عملية التطور، بَيْدَ أن هذه التغيرات نادرة الحدوث، بحيث إنه يمكن العثور على مجموعات من الجينات نفسها بالترتيب نفسه في الجينوم البشري وفي كروموسومات ثدييات أخرى كذلك كالقطط والكلاب. الكروموسوم بالأساس عبارة عن جزيء دي إن إيه طويل للغاية يشفِّر مئات أو آلاف الجينات. والدي إن إيه الخاص بالكروموسوم يتَّحِد مع جزيئات بروتينية تساعد على حَزْم الدي إن إيه في لفائف منتظمة داخل نواة الخلية (وهذه الجزيئات البروتينية تشبه الربطات التي تعمل على تجميع أسلاك الكمبيوتر على نحو منظَّم).

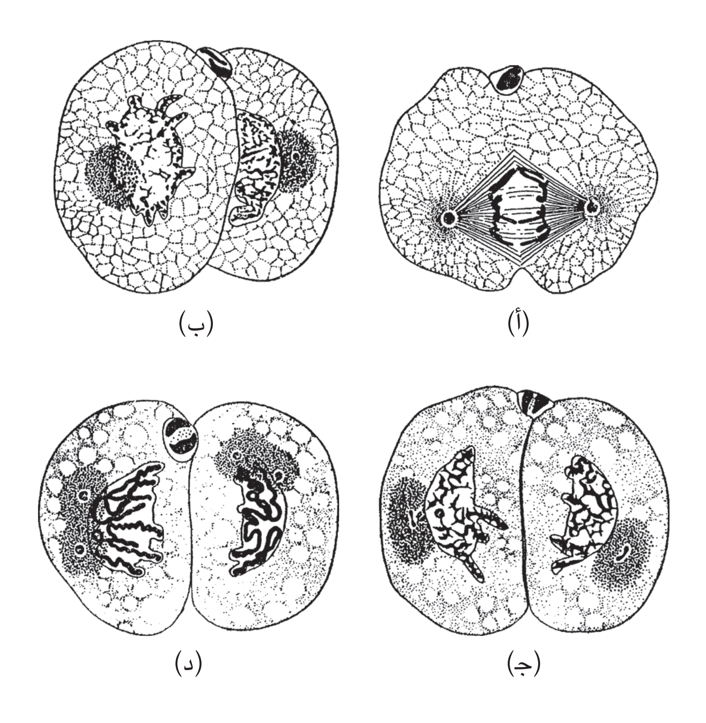
في حقيقيات النوى الأعلى، كالبشر، تحتوي كل خلية على مجموعةٍ واحدة من الكروموسومات مأخوذةٍ من الأم عن طريق نواة البويضة، ومجموعةٍ أخرى مأخوذةٍ من الأب عن طريق الحيوان المنوي (الشكل ٣-٦). في البشر، يوجد ثلاثة وعشرون كروموسومًا في أي مجموعة خاصة بالأب أو بالأم، بينما في ذبابة «دروسوفيلا ميلانوجاستر»، المستخدمة في الكثير من الأبحاث الوراثية، يكون عدد الكروموسومات خمسة (منها واحد صغير للغاية). وتحمل الكروموسوماتُ المعلوماتِ المطلوبةَ لتحديد تتابعات الأحماض الأمينية التي تُحدِّد أي البروتينات ستُنتَج بواسطة خلية الكائن.

ما هو الجين؟ وكيف يحدد بنية البروتين؟ الجين تتابع من أربعة «أحرُف» كيميائية (الشكل ٣-٥) من «الشفرة الوراثية»، فيه تتوافق مجموعات من ثلاثة أحرُف متجاوِرة




شكل ٣-٦: مخطط لزوج من الكروموسومات، مع رسم توضيحي لمنطقة صغيرة مكبَّرة لتوضيح ثلاثة جينات موجودة في هذه المنطقة من الكروموسوم، مع وجود دي إن إيه غير مشفِّر بين هذه الجينات. الجينات الثلاثة المختلفة مرسومة بدرجات مختلفة من اللون الرمادي كي تشير إلى أن كل جين يشفِّر بروتينًا مختلفًا. في الخلية الحقيقية، بعض البروتينات فقط ستُنتَج، بينما ستُكبَح جينات أخرى بحيث لا تتكون البروتينات الخاصة بها.

(ثلاثيات) مع كل حمض أميني في البروتين الذي يكون الجين مسئولًا عن تصنيعه (الشكل ٣-٨). بعد ذلك «يُترجَم» التتابع الجيني إلى التتابع الخاص بسلسلة بروتينية، وهناك ثلاثيات تميز نهاية سلسلة الحمض الأميني. يسبب تغير التتابع الجيني حدوث طفرة، وأغلب التغيرات من هذا النوع ستؤدي إلى وضع حمض أميني مختلف داخل بروتين عند تصنيعه (لكنْ نظرًا لوجود ٦٤ تجميعة ثلاثية ممكنة من حروف الدي إن إيه،




شكل ٣-٧: رسم توضيحي لخلية منقسمة من خلايا الدودة الخيطية، يبيِّن الكروموسوماتِ وهي لم تَعُدْ محصورةً داخل غشاء النواة (أ)، ومراحلَ متعدِّدةً في عملية الانقسام (ب، جـ)، وأخيرًا الخليتين الوليدتين، كلٌّ منهما بها نواة محاطة داخل غشاء (د).

واستخدام ٢٠ حمضًا أمينيًّا فقط في البروتينات، بعض الطفرات لا تُغيِّر التتابع البروتيني). وعلى امتداد النطاق الكامل للكائنات الحية، تختلف الشفرة الوراثية بقدْرٍ طفيف للغاية، وهو ما يوحي بقوة بأن كل أشكال الحياة على الأرض قدِ انحدرت من سلف مشترك. خضعت الشفرة الوراثية للدراسة للمرة الأولى في البكتيريا والفيروسات، لكن سريعًا ما فُحِصت ووُجِد أنها هي نفسها الموجودة في البشر، وقد رُصِدت كل طفرة ممكنة يمكن لهذه الشفرة توليدها في تتابع بروتين خلايا الدم الحمراء البشرية؛ الهيموجلوبين، وفي المقابل لم تحدث أية طفرة يستحيل حدوثُها باستخدام هذه الشفرة المحددة.

| الإنسان | aac | cag | aca | gga | gcc | cgg | tgc | ctg | gag | gtg | tcc | atc | tct | gac | ggg | ctc | ttc | ctc | agc | ctg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| البروتين | Asn | Glu | Thr | Gly | Ala | Arg | Cys | Leu | Glu | Val | Ser | Ile | Ser | Asp | Gly | Leu | Phe | Leu | Ser | Leu |
| الإنسان | aac | cag | aca | gga | gcc | cgg | tgc | ctg | gag | gtg | tcc | atc | tct | gac | ggg | ctc | ttc | ctc | agc | ctg |
| الشمبانزي | aac | cag | aca | gga | gcc | cgg | tgc | ctg | gag | gtg | tcc | atc | CcT | gac | ggg | ctc | ttc | ctc | agc | ctg |
| | | | | | | | | | | | | | Pro | | | | | | | |
| الكلب | aac | cag | acC | ggG | Ccc | cgg | tgc | ctg | gag | gtg | tcc | att | CcC | Aac | ggg | ctG | ttc | ctc | agc | ctg |
| | | | * | * | Pro | | | | | | | | Pro | * | | * | | | | |
| الفأر | aac | cag | Tca | gAG | CcT | Tgg | tgc | ctg | TaT | gtg | tcc | atc | CcA | gaT | ggC | ctc | ttc | ctc | agc | ctA |
| | | | Ser | Glu | Pro | Trp | | | Tyr | | | | Pro | * | * | | | | | * |
| الخنزير | aac | cag | acG | ggC | Ccc | cAg | tgc | ctg | gag | gtg | tcc | atT | CCC | gac | ggg | ctc | ttc | ctc | agc | ctg |
| | | | | | Pro | Glu | | | | | | * | Pro | | | | | | | |

| الإنسان | ggg | ctg | gtg | agc | ttg | gtg | gag | aac | gcg | ctg | gtg | gtg | gcc | acc | atc | gcc | aag | aac | cgg | aac |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| البروتين | Leu | Gly | Leu | Val | Ser | Leu | Val | Glu | Asn | Ala | Leu | Val | Val | Ala | Thr | Ile | Ala | Lys | Asn | Arg |
| الإنسان | ggg | ctg | gtg | agc | ttg | gtg | gag | aac | gCg | ctg | gtg | gtg | gcc | acc | atc | gcc | aag | aac | cgg | aac |
| الشمبانزي | ggg | ctg | gtg | agc | ttg | gtg | gag | aac | ATg | ctg | gtg | gtg | gcc | acc | atc | gcc | aag | aac | cgg | aac |
| | | | | | | | | | Met | | | | | | | | | | | |
| الكلب | ggg | ctg | gtg | agc | Gtt | gtg | gaa | aaT | gTg | ctg | gtg | gtg | gcc | Gcc | atT | gcc | aag | aac | cgC | aa |
| | | | | | * | | | * | Val | | | | | * | * | | | | * | |
| الفأر | ggg | ctg | gtg | agt | Ctg | gtg | gag | aaT | gTg | ctg | gtT | gtg | ATA | Gcc | atc | Acc | aaa | aac | cgC | aac |
| | | | | * | * | | | * | Val | | * | | * | * | | | | | * | |
| الخنزير | ggg | ctg | gtg | agC | ctC | gtg | gag | aac | gTg | ctg | gtg | gtg | gcc | Gcc | atc | gcc | aag | aac | cgC | aac |
| | | | | | | | | | Val | | | | | * | | | | | * | |

شكل ٣-٨

شكل ٣-٨: تتابعات الدي إن إيه والتتابعات البروتينية الخاصة بجزء من الجين المسئول عن مستقبِل الهرمون المنشِّط للخلية الميلانية الموضَّح في الشكل رقم ٣-٤، في الإنسان وفي عدد من الثدييات الأخرى. يبيِّن الشكل ٤٠ حمضًا أمينيًّا فقط من إجمالي ٩٥١ حمضًا أمينيًّا داخل البروتين. تتابعات الدي إن إيه البشرية معروضة بالأعلى، مع مسافات بين مجموعات حروف الدي إن إيه الثلاثية، أمَّا التتابعات البروتينية فمعروضة في الصفَّيْن المظلَّلَيْن بالرمادي الفاتح أسفلها (باستخدام شفرة ثلاثية الحروف للأحماض الأمينية المختلفة). الأنواع الأخرى موضَّحة أسفلهما. في الموضع الذي تختلف فيه تتابعات الدي إن إيه عن التتابعات البشرية، طُبع الحرف بحرف كبير. الثلاثيات التي تتضمن اختلافًا عن التتابعات البشرية، لكنها تشفِّر الأحماض الأمينية نفسها كما في الإنسان، موضوعة تحتَها نجمةٌ صغيرة، أمَّا الثلاثيات التي تشفِّر اختلافات عن التتابعات البروتينية البشرية، فمميَّزة بلون رمادي غامق. العديد من الأشخاص ذوي الشعر الأحمر لديهم نسخة مختلفة من الحمض الأميني في الثلاثي ١٥١.

من أجل تصنيع المنتج البروتيني الخاص بتتابع الدي إن إيه الخاص بالجين، يُنسَخ أولًا هذا التتابع إلى «رسالة» مصنوعة من جزيء مشابِه، هو الحمض النووي الريبوزي (آر إن إيه)، الذي يُنسَخ تتابُعُ «الحروف» الخاص به من ذلك التتابُعِ الخاص بالجين بواسطة إنزيم نسخ. تتفاعل رسالة الآر إن إيه مع آلة خلوية معقدة، مؤلَّفة من تجمُّع للبروتينات وجزيئات الآر إن إيه الأخرى، من أجْل ترجمة الرسالة وإنتاج البروتين المحدد بواسطة الجين. هذه العملية واحدة في جوهرها في كل الخلايا، بالرغم من أنها تحدث في حقيقيات النوى داخل السيتوبلازم، ويجب أن تنتقل الرسالة أولًا من النواة إلى مناطق الخلية التي تحدث بها عملية الترجمة. بين الجينات الموجودة على الكروموسومات توجد خيوط من الدي إن إيه لا تشفِّر أي بروتينات، وبعضٌ من هذا الدي إن إيه غير المشفِّر له وظيفة مهمة؛ إذ يكون بمنزلة مواقع لربط البروتينات التي تنشِّط عملية إنتاج رسائل الآر إن إيه الخاصة بالجينات أو تثبِّطها بحسب الحاجة؛ على سبيل المثال: تُنشَّط الجينات الخاصة بالهيموجلوبين في الخلايا التي تنمو لتكون خلايا دم حمراء، لكنها تُثبَّط في خلايا المخ.

على الرغم من الاختلافات الهائلة في أساليب حياة الكائنات المختلفة، التي تتراوح بين الكائنات الوحيدة الخلية والكائنات التي تتألَّف أجسامها من مليارات الخلايا وبها أنسجة عالية التخصص، فإن خلايا حقيقيات النوى تمرُّ بعمليات انقسام خلوي

متشابهة. الكائنات الوحيدة الخلايا، مثل الأميبا أو فطر الخميرة، يمكنها التكاثر ببساطة عن طريق الانقسام إلى خليتين وليدتين؛ وعلى نحوٍ مُشابِه، تمر البويضة المخصَّبة للكائن العديد الخلايا، التي نتجتْ عن اتِّحاد بويضة وحيوان منوي، بعملية انقسام مشابهة إلى خليتين وليدتين (الشكل ٣-٧). تحدث دورات عديدة أخرى من الانقسام الخلوي من أجل إنتاج أنواع الخلايا والأنسجة العديدة التي تكوِّن جسم الكائن البالغ. في الثدييات، يوجد أكثر من ٣٠٠ نوع مختلف من الخلايا في جسد الكائن البالغ، وكل نوع له بنية مميزة ويُنتِج نطاقًا محددًا من البروتينات. وعملية تنظيم هذه الخلايا على صورة أنسجة وأعضاء خلال عملية النمو تتطلَّب شبكةً من التفاعلات الخاضعة لمستوًى معقَّد من السيطرة بين خلايا الجنين النامي. تُنشَّط الجينات أو تُثبَّط من أجل ضمان إنتاج النوع المناسب من الخلايا في الموضع المناسب وفي التوقيت المناسب. وبالحديث عن بعض الكائنات التي خضعت لدراسة مستفيضة، مثل ذبابة الفاكهة «دروسوفيلا ميلانوجاستر»، نعلم الآن قدرًا كبيرًا من المعلومات بشأن الكيفية التي تؤدي بها هذه التفاعلات إلى ظهور التصميم الجسماني المعقد للذبابة، انطلاقًا من خلية بويضة لا تحمل سمات شكلية مميزة. وقد وجدنا أن العديد من عمليات نقل الإشارات المستخدمة في مرحلة نمو أنسجة معينة وتخصُّصها، مثل الأعصاب، تتقاسمها كلُّ الحيوانات العديدة الخلايا، بينما تستخدم النباتات الأرضية مجموعة مختلفة نوعًا ما، وهو ما يمكن توقُّعُه من حقيقةِ أن السجل الأحفوري يبيِّن أن الحيوانات العديدة الخلايا والنباتات لها أصولٌ تطوُّرية مختلفة (انظر الفصل الرابع).

حين تنقسم الخلية، فأول ما يحدث هو تضاعُف الدي إن إيه الخاص بالكروموسومات، بحيث تصير هناك نسختان من كلِّ كروموسوم. تخضع عملية الانقسام الخلوي لضوابط صارمة من أجل ضمان مرور تتابع الدي إن إيه المنسوخ حديثًا بعملية «تصحيح لغوي» بحثًا عن الأخطاء. تملك الخلايا إنزيمات يمكنها — باستخدام خصائص معيَّنة للطريقة التي يتمُّ بها تضاعُفُ الدي إن إيه — أنْ تميِّزَ الدي إن إيه الجديد عن «قالب» الدي إن إيه القديم؛ وهذا يُمكِّن من رصد أغلب الأخطاء التي تتم أثناء عملية النسخ وتصحيحها، وهو ما يضمن نسْخَ القالب بأمانةٍ قبل أن يُسمَح للخلية بالمضيِّ قُدمًا في الخطوة التالية؛ انقسام الخلية نفسها. تضمن آليةُ الانقسام الخلوي أن تتلقَّى كلُّ خلية وليدة نسخةً كاملة من مجموعة الكروموسومات التي كانت موجودة في الخلية الأم (الشكل ٣-٧).

أغلب جينات بدائيات النوى (بما فيها العديد من الفيروسات) هي أيضًا تتابعات من الدي إن إيه مُنظَّمة على نحو مختلف بدرجة طفيفة عن تلك الموجودة في كروموسومات حقيقيات النوى. أنواع كثيرة من البكتيريا تتألَّف مادتُها الوراثية فقط من جزيء دي إن إيه دائري، لكن بعض الفيروسات — كفيروسات الأنفلونزا والإيدز — لديها جينات مصنوعة من الآر إن إيه. إن عملية التصحيح التي تحدث عند نسْخِ الدي إن إيه لا تحدث عند نسْخِ الآر إن إيه؛ ولهذا تملك تلك الفيروسات معدلاتِ تطافُرٍ عاليةً للغاية، ويمكنها التطوُّرُ بسرعةٍ كبيرة داخل جسد العائل. وكما سنصف في الفصل الخامس، يعني هذا أنه من الصعب تطوير لقاحات مضادة لهذه الفيروسات.

تتباين حقيقيات النوى وبدائيات النوى تباينًا شاسعًا من حيث مقادير الدي إن إيه غير المشفِّر الموجودة بها؛ ففي البكتيريا الإشريكية القولونية (وهي في المعتاد نوع غير ضار من البكتيريا يعيش في أمعائنا) يوجد حوالي ٤٣٠٠ جين، وتشكِّل التسلسلاتُ المشفِّرة تتابعاتٍ بروتينيةً نحو ٨٦ بالمائة من الدي إن إيه الخاص بهذا النوع. على النقيض من ذلك، أقل من ٢ بالمائة من الدي إن إيه الموجود في جينوم الإنسان يشفِّر تتابعات بروتينية. وتقع الكائنات الأخرى بين طرفي النقيض هذين؛ فمثلًا ذبابة الفاكهة «دروسوفيلا ميلانوجاستر» بها نحو ١٤ ألف جين مؤلَّفة من نحو ١٢٠ مليون «حرف» من الدي إن إيه، ونحو ٢٠ بالمائة من الدي إن إيه الخاص بها مخصَّص لتشفير التتابعات. لا يزال عدد الجينات المختلفة في الجينوم البشري غير معروف بدقة، وأفضل تعداد حالي يأتي من عملية تحديد تتابعات الجينوم الكامل، وهذا يمكِّن علماء الوراثة من التعرف على التتابعات المحتمل أنها تؤلِّف جيناتٍ، بناءً على ما نَعرِفه من الجينات التي خضعت للدراسة من قبلُ. من الصعب العثور على هذه التتابعات في خضم المقدار الهائل للدي إن إيه الذي يؤلف جينوم أي نوع، خاصة الجينوم البشري ذا المحتوى الضخم للغاية من الدي إن إيه (أكبر بخمس وعشرين مرة من ذبابة الفاكهة). يبلغ عدد الجينات في الإنسان نحو ٣٥ ألف جين، وهو عدد أقل بكثير مما كان يُظَن في ضوء عدد أنواع الخلايا والأنسجة التي تؤدي وظائف مختلفة، وعدد البروتينات التي يستطيع الإنسان تصنيعها من المرجح أن يكون أكبر بكثير من هذا العدد؛ لأن طريقة العَدِّ هذه تَعجِز عن رصد الجينات الصغيرة للغاية، أو غير التقليدية (على سبيل المثال: الجينات الواقعة داخل جينات أخرى، وهو الأمر الموجود في كائنات عِدَّة). ليس معروفًا بعدُ مقدار الدي إن إيه غير المشفِّر الضروري لحياة الكائن، بالرغم من أن معظمه يتكون من فيروسات وغيرها

من الكيانات المتطفلة التي تعيش في الكروموسومات، وبعضها له وظائف مهمة. وكما ذكرنا بالفعل، هناك تتابعات من الدي إن إيه تقع خارج الجينات يمكنها الارتباط بالبروتينات التي تتحكم في عملية تحديد الجينات التي يتم «تنشيطها» داخل الخلية، ومن المؤكد أن عملية التحكم في نشاط الجينات أكثر أهميةً بكثير في الكائنات العديدة الخلايا منها في البكتيريا.

إضافةً إلى اكتشاف أن كائنات متباينة تباينًا شاسعًا لها المادة الوراثية ذاتها من الدي إن إيه، كشف علم الأحياء الحديث أيضًا النقاب عن أوجه شبه عميقة في دورات حياةِ حقيقياتِ النوى، على الرغم من تنوُّعها، بدايةً من الفطريات الوحيدة الخلية كفطر الخميرة، ومرورًا بالنباتات والحيوانات الحولية، ووصولًا إلى الكائنات الطويلة العمر (وإن كانت ليست خالدة) كالبشر والأشجار. العديد من حقيقيات النوى، وإن لم يكن كلها، يمر بمراحل جنسية في كل جيل، يتحد فيها جينوما الأب والأم الخاصان بالحيوان المنوي والبويضة (وكلٌّ منهما مؤلَّف من العدد (ن) من الكروموسومات المختلفة، بحسب النوع محل الحديث) من أجل تكوين فردٍ يحمل العددَ (٢ن) من الكروموسومات؛ وحين يقوم الكائن بتصنيع بويضات أو حيوانات منوية جديدة (بحسب جنسه)، فإن الحالة (ن) تُستعاد عن طريق نوع خاص من الانقسام الخلوي. في هذا النوع، يصطفُّ كل زوج من كروموسومات الأب والأم، وبعد ذلك (بعد تبادل المادة لتكوين كروموسومات هي مزيج في جزء منها من دي إن إيه الأب ودي إن إيه الأم) تنفصل أزواج الكروموسومات بعضها عن بعض، بصورة مشابهة للطريقة التي تنفصل بها الكروموسومات المتضاعفة حديثًا في عمليات الانقسام الخلوي الأخرى؛ وفي نهاية العملية يكون عدد الكروموسومات في كل بويضة أو حيوان منوي قد قلَّ إلى النصف، لكن كل بويضة أو حيوان منوي يملك مجموعةً كاملة من جينات الكائن؛ وستُستعاد المجموعةُ المزدوجة عند اتحاد البويضة بنواة الحيوان المنوي عند الإخصاب.

من المؤكد أن الملامح الأساسية للتكاثر الجنسي قد تطورت قبل تطور الحيوانات والنباتات العديدة الخلايا — التي حلَّت متأخِّرة على المشهد التطوري — بزمن طويل، ويتضح هذا جليًّا من الملامح المشتركة الظاهرة في تكاثر الكائنات الوحيدة الخلية والعديدة الخلايا الجنسي، ومن الجينات والبروتينات المتشابهة، التي اكتُشِف أنها منخرطة في عملية التحكم في الانقسام الخلوي وسلوك الكروموسومات في مجموعاتٍ متباعدٍ بعضها عن بعض تباعُدَ فطرِ الخميرة عن الثدييات. في أغلب حقيقيات النوى الوحيدة الخلية، نجد

أن الخلية (٢ن) المنتجة بواسطة اندماج زوج من الخلايا، كلٌّ منها له العدد (ن) من الكروموسومات؛ تنقسم على الفور كي تنتج خليتين لهما العدد (ن) من الكروموسومات، على النحو المبيَّن أعلاه في حالة إنتاج الخلايا الجنسية في الحيوانات العديدة الخلايا. وفي النباتات، يحدث اختزال عدد الكروموسومات من (٢ن) إلى (ن) قبل تكوُّن الأمشاج الأنثوية وحبوب اللقاح، لكن نفس النوع من عملية الانقسام الخلوي الخاصة يحدث مجددًا؛ ففي الأشنات — على سبيل المثال — توجد مرحلة ممتدة من دورة الحياة تشكل فيها كروموسومات عددها (ن) نبات الأشنة، وفوقها تتطور المرحلة الطفيلية ذات العدد (٢ن) من الكروموسومات، بعد أن تكون الأمشاج الأنثوية وحبوب اللقاح قد تكوَّنت ويكون الإخصاب قد حدث.

هذه التعقيدات التي تتميز بها مثل هذه العمليات الجنسية غير موجودة في بعض الكائنات العديدة الخلايا. في مثل هذه الأنواع «اللاجنسية» تُنتِج الكائناتُ الأمُّ الكائناتِ الوليدة دون اختزال عدد الكروموسومات من (٢ن) خلال عملية إنتاج البويضة. ومع هذا، كل الكائنات اللاجنسية العديدة الخلايا تُظهِر علامات واضحة تكشف أنها منحدرة من أسلاف كانت تتكاثر جنسيًّا؛ على سبيل المثال: الهندباء الشائعة لا جنسية، وبذورها تتكون دون الحاجة إلى جلب حبوب اللقاح إلى أزهارها، كما هو ضروري في حالة أغلب النباتات كي تتكاثر. تمثل هذه مزية لعشب ضار كالهندباء الشائعة، التي تُنتِج بسرعة أعدادًا كبيرة من البذور، وهو ما يمكن أن يراه كلُّ مَن يملك رقعة عشب أمام منزله. إلا أن أنواع الهندباء الأخرى تتكاثر بالتزاوج الطبيعي بين الأفراد، والهندباء الشائعة مرتبطة على نحو وثيق بهذه الأنواع؛ ومِن ثَمَّ فهي لا تزال تصنع حبوب لقاح تستطيع إخصاب أزهار الأنواع الجنسية.

## الطفرات وآثارها

على الرغم من وجود آلية التصحيح التي تصوِّب الأخطاء عند نسْخ الدي إن إيه خلال عملية الانقسام الخلوي، فإن الأخطاء تحدث لا محالة، وهذه الأخطاء هي مصدر الطفرات. إذا نتج عن الطفرة تغيُّرٌ في تتابع الأحماض الأمينية لأحد البروتينات، فقد يصير البروتين معطوبًا؛ فمثلًا: قد لا يلتفُّ حولَ نفسه على النحو الصحيح؛ ومِن ثَمَّ يعجز عن القيام بوظيفته على النحو الملائم. وإذا أصاب التغيُّر أحد الإنزيمات، فقد يتسبَّب هذا في جعل المسار الأيضي الذي ينتمي الإنزيم إليه يسير بصورة بطيئة، أو

يتوقَّف تمامًا، كما في حالة طفرات المَهَق التي ذكرناها سلفًا. قد تتسبَّب الطفرات التي تصيب البروتينات البنوية أو تلك الخاصة بعمليات التواصل، في إعاقة وظائف الخلايا أو إعاقة نمو الكائن؛ فالعديد من الأمراض التي تصيب البشرَ تسبِّبها طفراتٌ؛ على سبيل المثال: الطفرات التي تصيب الجينات المشتركة في التحكُّم في عملية الانقسام الخلوي تزيد مخاطِرَ ظهور السرطان. وكما ذكرنا من قبلُ، فإن الخلايا تملك نُظُمَ تحكُّمٍ دقيقة من أجل ضمان أنها تنقسم فقط حين يكون كلُّ شيء على ما يرام (فلا بد أن تكتمل عملية البحث عن طفرات، ويجب ألَّا تُظهِر الخلية أيَّ علامات على العدوى أو أيَّ تلفٍ آخَر، وهكذا دواليك). يمكن أن تتسبَّب الطفرات التي تصيب نُظُمَ التحكُّم هذه في عمليات انقسام خلوي غير خاضعة للسيطرة، وفي نمو خبيث للسلالة الخلوية. ولحُسْن الحظِّ أن من المستبعَد أن تُصيب الطفرات كِلتَا نسخَتَيِ الجينات الموجودة في الخلية، وعادةً ما تكون نسخةٌ واحدة غيرُ طافرة من زوج الجينات كافيةً كي تعمل الخليةُ بشكل صحيح. أيضًا تتطلب السلالة الخلوية في المعتاد تعديلات أخرى كي تصير سرطانًا، ولهذا تكون الأورام الخبيثة غيرَ شائعة. (يحتاج الورم إلى إمداد من الدم، ويجب أن تتفادى السماتُ غير الطبيعية للخلايا الرصدَ من جانب الجسد.) ومع ذلك، يُعَدُّ فهْمُ الانقسام الخلوي والتحكم فيه جزءًا مهمًّا من الأبحاث المعنية بالسرطان. إن العملية متشابهة في خلايا الكائنات الحقيقية النوى لدرجة أن جائزة نوبل في الطب لعام ٢٠٠١ مُنِحت للأبحاث المُجراة على الانقسام الخلوي في فطر الخميرة، التي بيَّنتْ تعرُّضَ أحد الجينات المشاركة في نظام التحكم الخاص بخلايا فطر الخميرة للطفرة في بعض أنواع السرطان الوراثية لدى البشر.

الطفراتُ التي تجعل الجسم أكثر قابليةً لتكوين أورام سرطانية نادرة الوجود، مثلُها مثل جميع الطفرات المسبِّبة للأمراض. أكثرُ الأمراض الجينية شيوعًا في التجمعات السكانية التي تقطن شماليَّ أوروبا هو التليُّفُ الكيسي، لكنْ حتى في هذه الحالة، فإن التتابع غير الطافر للجين المتصل بالمرض يمثِّل أكثر من ٩٨ بالمائة من نُسَخ الجين في ذلك التجمع. إن الطفرات التي تسبِّب فشلَ أحد الإنزيمات أو البروتينات المهمة قد تخفض القدْرةَ على البقاء أو الإخصاب لدى الأفراد المصابين بها؛ ومن ثَمَّ فإن التتابع الجيني الذي يؤدِّي إلى وجود إنزيم غير عامل سيكون حاضرًا بنسبةٍ أقلَّ في الجيل التالي، وفي النهاية سيُمحَى من التجمُّع تمامًا؛ فأحدُ الأدوار الأساسية للانتخاب الطبيعي هو

أن تظلَّ البروتينات والإنزيمات الأخرى لمعظم الأفراد تعمل جيدًا. وسنعاود الحديث عن هذه الفكرة في الفصل الخامس.

يؤدِّي أحد الأنواع المهمة من الطفرات إلى عدم إنتاج كمية كافية من بروتين معين بواسطة الجين الخاص به، ويمكن أن يحدث هذا بسبب مشكلة في نظام التحكم الطبيعي الخاص بذلك الجين، تتسبَّب إمَّا في تنشيط الجين حين ينبغي عدم فعل ذلك، وإمَّا في عدم إنتاج البروتين بالكميات الكافية، وإمَّا في وقف إنتاج البروتين قبل اكتماله. وتوجد طفرات أخرى لا تتسبَّب في وقف عملية إنتاج الإنزيم، لكن قد يكون الإنزيم معيبًا، تمامًا مثلما يمكن أن يُعاق خطُّ الإنتاج أو يتوقَّف إذا تضرَّرَتْ إحدى الأدوات أو الماكينات الضرورية بصورةٍ ما. إذا غاب واحد أو أكثر من الأحماض الأمينية المكوِّنة للبروتين، فقد لا يعمل البروتين بصورة سليمة، ويمكن أن يحدث الأمر عينُه لو ظهر حمض أميني مختلف في موضع معيَّن على السلسلة، حتى لو كانت بقية الأحماض الأمينية صحيحة. إن الطفرات المسبِّبة لفقدان الوظيفة يمكن أن تُسهِم في عملية التطور حين يتوقف الانتخاب الطبيعي عن التخلص منها (انظر الفصل الثاني والسادس لمعرفة الكيفية التي يمكن بها لطفرات محايدة من المنظور الانتخابي أن تنتشر). نحو ٦٥ بالمائة من جينات المستقبِلات الشمِّيَّة لدى البشر هي «جينات لا وظيفية» لا تُنتِج مستقبلاتٍ بروتينيةً عامِلة؛ ولهذا السبب نملك وظائفَ شمِّية أقلَّ من الفئران أو الكلاب (وهو أمر ليس مُثِيرًا للدهشة في ضوء أهمية حاسة الشم لدى هذه الحيوانات في الحياة اليومية والتفاعلات الاجتماعية، مقارَنةً بدورها الثانوي لدينا).

هناك أيضًا اختلافات بين الأفراد الطبيعيين في النوع ذاته؛ على سبيل المثال: يتباين الأفراد داخل التجمعات البشرية من حيث قدرتهم على تذوق أو شم مواد كيميائية معينة، أو على تكسير بعض المواد الكيميائية المستخدمة كمواد تخدير؛ فالأشخاص الذين يفتقرون إلى إنزيم يقوم بتكسير المادة المخدِّرة قد يُعانون من ردِّ فعلٍ سيِّئ لها، لكن نقصان هذا الإنزيم لن يكون له أيُّ تأثير آخَر خلاف ذلك. تُعَدُّ الاختلافات المشابهة في القدرة على التعامل مع العقاقير، وأحيانًا الأطعمة، جانبًا مهمًّا للتنوع لدى البشر، ومعرفةُ هذه الاختلافات ضروريةٌ للطب الحديث، الذي تُستخدَم فيه عادةً عقاقيرُ قويةٌ.

تُظهِر الطفراتُ التي تصيب إنزيم نازعة هيدروجين الجلوكوز ٦ فوسفات (وهو إنزيم يوجد في خطوة مبكرة في المسار الذي بواسطته تولِّد الخلايا الطاقةَ من الجلوكوز) بعضَ أنواع هذه الاختلافات بوضوح؛ فالأفراد الذين يفتقدون هذا الجين بالكامل لا

يستطيعون البقاء أحياءً (لأن المسار الذي يعمل فيه هذا الإنزيم له أهمية حيوية في التحكم في مستويات المواد السامة المُنتجة بوصفها منتجًا جانبيًّا لعملية توليد الطاقة بالخلية). في التجمعات البشرية، يوجد ما لا يقل عن ٣٤ صورة متنوعة طبيعية للبروتين، وكلها غير متوافقة مع الحياة الصحية، لكنها في واقع الأمر تحمي من طفيليات الملاريا. كل صورة تختلف في واحد أو أكثر من الأحماض الأمينية عن أكثر تتابعات البروتين الطبيعية شيوعًا. ينتشر العديد من هذه الصور المختلفة في أفريقيا ومنطقة البحر المتوسط، ويكثر في بعض التجمعات التي تصيبها الملاريا وجودُ الأفراد الحاملين لهذه الصور المختلفة؛ ومع ذلك، بعض الصور المختلفة تسبِّب نوعًا من فقر الدم عند تناوُل نوع معين من الفول، أو عند تلقِّي الشخص نوعًا معيَّنًا من العقاقير المضادة للملاريا. تُعَدُّ فصائل الدم المعروفة، A وB وO وغيرها من الفصائل، مثالًا آخَر على التنوع الطبيعي داخل التجمع البشري، وهي تنتج عن تباين التتابعات البروتينية المتحكِّمة في تفاصيل الأسطح الخاصة بخلايا الدم الحمراء. كذلك يمكن أن يسبِّب التبايُنُ في بروتينِ مستقبِلِ الهرمون المنشِّطِ للخلية الميلانية — الذي له دور مهم في إنتاج صبغة الميلانين الجلدية (انظر الشكل ٣-٤) — اختلافاتٍ في لون الشعر، وفي العديد من الأشخاص ذوي الشعر الأحمر يكون لهذا البروتين تتابُعٌ مختلفٌ من الأحماض الأمينية. وكما سنناقش في الفصل الخامس، فإن التنوع الجيني هو المادة الخام الأساسية التي يعمل عليها الانتخاب الطبيعي من أجل إنتاج التغيرات التطورية.

## التصنيف البيولوجي وتتابعات الدي إن إيه والتتابعات البروتينية

تأتي مجموعة جديدة مهمة من البيانات التي تقدم دليلًا واضحًا على أن الكائناتِ مرتبطٌ بعضها ببعض، عن طريق عملية التطور من الحروف التي يتألَّف منها الدي إن إيه الخاص بها، والتي يمكن الآن «قراءتها» بواسطة العملية الكيميائية الخاصة بتحديد تتابُع الدي إن إيه. إن أنظمة التصنيف البيولوجي المبنية على الخصائص المرئية، التي طُوِّرت على مدار ثلاثة قرون ماضية من دراسة النباتات والحيوانات؛ باتتِ الآن مدعومة من جانب الدراسات الحديثة التي تقارن تتابعات الدي إن إيه والتتابعات البروتينية بين الأنواع المختلفة؛ فقياس مقدار تشابه تتابعات الدي إن إيه يمكِّنُنا من امتلاك مفهوم موضوعي عن العلاقة بين الأنواع، وهو ما سنناقشه بمزيد من التفصيل في الفصل السادس. لكن في الوقت الحالي نحن فقط بحاجة إلى أن نفهم أن تتابعات الدي إن إيه

الخاصة بأي جين ستكون أكثرَ شبهًا في حالة الأنواع الوثيقة الصلة، أما في حالة الأنواع الأبعد بعضها عن بعض فستكون التتابعاتُ أكثرَ اختلافًا (الشكل ٣-٨). ويزداد حجم الاختلاف بالتناسُب تقريبًا مع مقدار الوقت الذي يفصل بين النوعين محل المقارَنة، وهذه السمةُ من سمات علم الأحياء الجزيئي تمكِّنُ علماءَ الأحياء التطوريين من تقدير أزمنة الأحداث التي لا يمكن دراستها من خلال الحفريات، وذلك باستخدام «ساعة جزيئية»؛ على سبيل المثال: ما ذكرناه بالفعل من التغيرات الموجودة في ترتيب جينات الكائن على كروموسوماته. من الممكن أن تُستخدَم ساعةٌ جزيئية من أجل تقدير المعدل الذي تحدث به عمليات إعادة الترتيب هذه بالكروموسومات، وقد وجدنا — بما يتوافق مع وجهة النظر التطورية — أن الأنواع التي نؤمن أنها متقارِبةٌ، كالبشر والقِرَدة الريصية، لها كروموسومات تتباين من حيث عدد عمليات إعادة الترتيب بدرجة أقل ممَّا عليه الحال عند المقارنة بين البشر ورئيسيات العالَم الجديد مثل السعدان الصوفي.

في الفصل التالي سنشرح الأدلة المؤيِّدة للتطور بناءً على السِّجِلِّ الحفري، ومن واقع المعطيات المبنية على التوزيع الجغرافي للأنواع الحية؛ وهذه الملاحظات تكمل تلك المذكورة في هذا الفصل، من حيث إنها تبيِّن أن نظرية التطور تقدِّم تفسيرًا طبيعيًّا لنطاق واسع من الظواهر البيولوجية.

الفصل الرابع

# الأدلة المؤيِّدة للتطور: أنماط في الزمان والمكان

ما تاريخ الإنسان، إذن، سوى تموُّجٍ قصيرِ الأمد في محيط الزمن؟

من كتاب «عن تفاعُل القوى الطبيعية»،
هيرمان فون هلمهولتز، ١٨٥٤

## عُمْر كوكب الأرض

كان سيغدو ضربًا من المحال أن ندرك أن الكائنات الحية نشأت من خلال عملية التطور، لولا نجاح الجيولوجيين في أواخر القرن الثامن عشر وبدايات القرن العشرين في إثبات أن البنية الحالية للأرض هي نفسها نتاجُ عمليات فيزيائية دامتْ لفترة طويلة. إن العمليات ذات الصلة مشابِهةٌ من حيث المبدأ لتلك التي يستخدمها المؤرخون والأثريون، وقد كتب عالِم الطبيعة الفرنسي العظيم جورج دي بوفون عام ١٧٧٤ يقول:

> تمامًا مثلما نقوم في التاريخ المدني بالرجوع إلى المسوغات، ودراسة الميداليات، وفك طلاسم الكتابات القديمة، من أجْل تحديد حِقَب الثورات البشرية وإصلاح تاريخ الأحداث الأخلاقية، فإن علينا أيضًا في التاريخ الطبيعي أن ننقِّب في سِجِلَّات العالم، وأن نستخلص البقايا العتيقة من باطن الأرض، وأن نقوم

بجمع شظاياها، وأن نضمَّ معًا في جسد واحد من الأدلة كلَّ تلك الإشارات الدالة على تغيرات فيزيائية، التي يمكن أن تَحمِلنا إلى الماضي نحو عصور مختلفة للطبيعة. هذا هو السبيل الوحيد لإصلاح نقاط معينة في رحابة المكان، والسبيل الوحيد لوضع علامات مميزة على المسار الأبدي للزمن.

دون أن نخاطر بالمبالغة في التبسيط نقول إنه كانت هناك فكرتان أساسيتان هما اللتان أدَّتا إلى نجاحات على مستوى الجيولوجيا المبكرة، وهما: مبدأ «الوتيرة الواحدة»، وابتكار «علم وصف طبقات الأرض» بوصفه وسيلةً للتأريخ. يرتبط مبدأُ الوتيرة الواحدة خصوصًا بالجيولوجي جيمس هاتون الذي عاش في إدنبرة في أواخر القرن الثامن عشر، وجمَعَه وصنَّفَه لاحقًا عالِمٌ اسكتلندي آخَر هو تشارلز لايل في كتابه «مبادئ الجيولوجيا» (١٨٣٠). والمبدأ ببساطة يتمثَّل في أننا نطبِّق على تاريخ بنية الأرض المبادئَ نفسَها التي استخدمها الفلكيون في فهم منظومة الكواكب والنجوم البعيدة؛ إذ يُفترَض أن العمليات الفيزيائية الأساسية ذات الصلة تكون واحدةً في كل مكان وكل زمان؛ فالتغيُّرُ الجيولوجي على مرِّ الزمن إنما يعكس عملَ قوانين الفيزياء، التي هي نفسها لا تتغيَّر. على سبيل المثال: تقضي النظريةُ الطبيعية بأن سرعة دوران الأرض من المؤكَّد أنها قد قلَّتْ على مدار ملايين الأعوام بسبب قوى الاحتكاك التي يسبِّبها المدُّ والجزْرُ، اللذان يحدثان بسبب قوى الجاذبية الخاصة بالشمس والقمر؛ فطولُ اليوم الآنَ أطولُ بكثير ممَّا كان عليه حين كانت الأرض في بداياتها، لكنَّ مقدارَ شدة قوة الجاذبية لم يتغيَّر.

بطبيعة الحال لا يوجد تبرير مستقلٌّ لهذا الافتراض الخاص بالوتيرة الواحدة، وذلك مثلما لا يوجد أي مبرِّر منطقي لافتراض انتظام الطبيعة، ذلك الافتراض الذي تقوم عليه أهم جوانب حياتنا اليومية. في الواقع، لا يوجد فارق بين هذين الافتراضين، فيما عدا النطاقين المكاني والزماني اللذين ينطبقان عليهما. ومبرِّر هذين الافتراضين هو أنه؛ أولًا: تمثِّل الوتيرةُ الواحدة أكثرَ الأسس المكنة بساطةً التي يمكننا الانطلاق منها لتفسير الأحداث البعيدة زمنيًّا ومكانيًّا. ثانيًا: حقَّقَ هذا المبدأ نجاحًا لا غبارَ عليه.

يقضي افتراض الوتيرة الواحدة في علم الجيولوجيا بأن التنظيم الحالي لسطح الأرض إنما يعكس الفعْلَ التراكمي لعمليات تكوين الصخور الجديدة بواسطة النشاط البركاني

وطرح الرواسب في الأنهار والبحيرات والبحار، وتآكُل الصخور القديمة بفعل الرياح والمياه والجليد. إن عملية تكوُّن الصخور الرسوبية، مثل الحجر الرملي والحجر الجيري، تعتمد على تآكُل صخور أخرى؛ وعلى النقيض من ذلك، لا بد أنَّ تكوُّنَ الجبال بفعل النشاط البركاني وارتفاعُ الأرض بفعل الزلازل، يسبقان تفتُّتَها بفعل عملية التآكُل. هذه العمليات يمكن رؤيتها وهي تجري بالفعل في وقتنا الحالي، فأي شخص زار منطقة جبلية — خاصةً في وقتِ تكوُّن الجليد وذوبانه من العام — سيرى تآكُلَ الصخور وانتقالَ الفتات الناتج للأسفل مع جريان الجداول والأنهار، أيضًا من السهل ملاحَظةُ تجمُّعِ الرواسب عند مصبَّات الأنهار. إن النشاط البركاني والزلزالي مقتصر على مناطق معينة في الكوكب، خاصةً عند أطراف القارات وأواسط المحيطات، وذلك لأسباب معروفة الآن جيدًا، لكن هناك العديد من الحالات المسجَّلة تكوَّنَتْ فيها جُزُرٌ محيطية بفعل النشاط البركاني، وارتفعت فيها الأرضُ بفعل الزلازل. في كتابه «رحلة السفينة بيجل»، وصف داروين تأثيرات الزلزال الذي وقع في شيلي في فبراير ١٨٣٥ بالكلمات التالية:

> التأثير الأبرز لهذا الزلزال كان الارتفاعَ الدائم للأرض، وسيكون من الأصوب أن نتحدَّث عن الزلزال بوصفه المسبِّبَ الرئيس لذلك الارتفاع. لا يمكن أن يوجد شكٌّ في أن الأرض حول خليج كونسيبسيون ارتفعَتْ بمقدار قدَمَيْن أو ثلاثة أقدام … وفي جزيرة سانتا ماريا (البعيدة بنحو ثلاثين ميلًا) كان الارتفاعُ أكبرَ، وفي أحد الأجزاء وجَدَ القبطان فيتزروي تجمعاتٍ من أصداف المحار المتحلِّل «لا تزال ملتصقةً بالصخور»، فوق مستوى الماء بعشرة أقدام … وارتفاعُ هذه المنطقة مُثيرٌ للاهتمام بشكل خاص؛ لأنها كانت مسرحًا للعديد من الزلازل العنيفة الأخرى، وأيضًا بسبب تناثُر عدد كبير من أصداف المحار على مساحة شاسعة من الأرض، حتى ارتفاعٍ لا يقلُّ بالتأكيد عن ٦٠٠ قدم، وإن كنتُ أعتقد أنه يصل إلى ١٠٠٠ قدم.

حقَّقَ علم الجيولوجيا نجاحًا كبيرًا في تفسير بنية الأرض على مستوى السطح، أو بقربه، في ضوء هذه العمليات، وفي إعادة بناء الأحداث التي أدَّت إلى المَظهَر الحالي للعديد من أجزاء الأرض، ومن الممكن تحديد ترتيب هذه الأحداث من خلال علم وَصْف

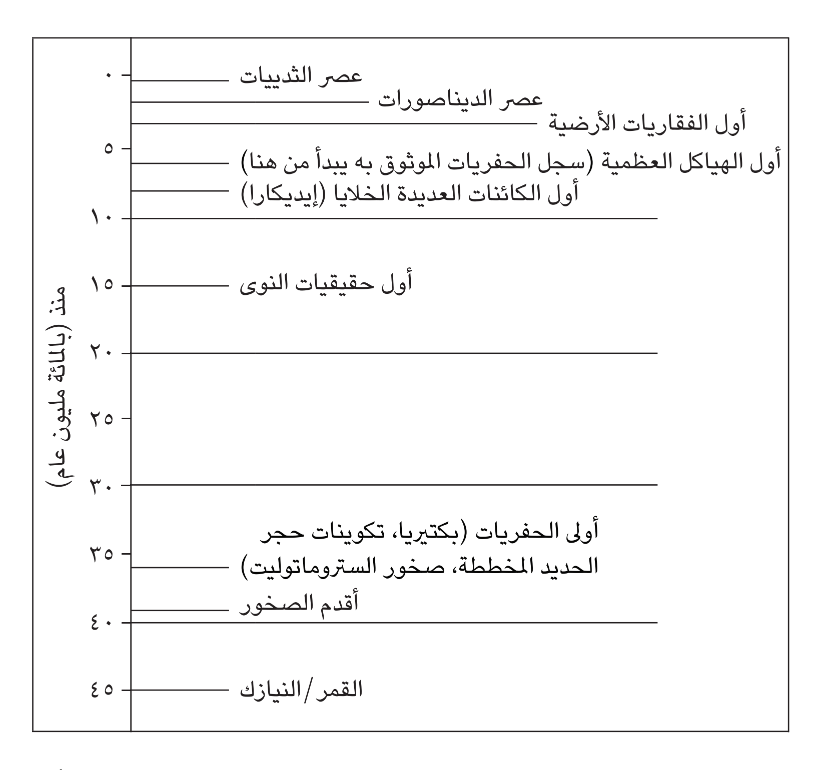
طبقات الأرض. إن المعلومات الخاصة بالتركيب المعدني ونَسَق الحفريات المعثور عليها في طبقات الصخور المختلفة، تُستخدَم في وصف الطبقات المنفردة. وقد كان إدراكُ أن الحفريات تمثِّل البقايا المحفوظة للنباتات والحيوانات التي ماتت منذ أمد بعيد، وليس كونها محضَ تكوينات معدنية؛ عاملًا أساسيًّا في نجاح علم وَصْف طبقات الأرض. وتُوفِّر نوعياتُ الحفريات الموجودة في أي طبقة صخرية رسوبية أدلَّةً بشأن البيئة التي سادت عند تكوُّن هذه الطبقة، فمثلًا من الممكن عادةً أن نعرف هل كان الحيوان يعيش في المياه المالِحة أم العذبة أم على الأرض. وبطبيعة الحال لا توجد حفريات في صخورٍ مثل الجرانيت أو البازلت، التي تتكوَّن عن طريق تجمُّد المواد المنصهرة من أسفل القشرة الأرضية.

خلال سفرياته في عموم بريطانيا بهدف تشييد القنوات في أوائل القرن التاسع عشر، أدرَكَ مهندس القنوات الإنجليزي ويليام سميث أن سلاسلَ متتاليةً متشابِهةً من الطبقات الصخرية موجودةٌ في أجزاء مختلفة من بريطانيا (التي بها تنوُّعٌ غيرُ معتاد من الصخور المتكوِّنة في عصورٍ مختلفة لا يتناسب مع مثل هذه المساحة الصغيرة من الأرض). وباستخدام المبدأ القائل إن الصخور القديمة يجب في الطبيعي أن تقع أسفلَ الصخور الحديثة، مكَّنت مقارَنةُ السلاسل المتتالية في المناطق المختلفة الجيولوجيين من إعادة بناء تتابُعات الطبقات الصخرية، التي تكوَّنت على مدار فترات زمنية هائلة؛ فإذا وُجدت صخورٌ من النوع (أ) أسفلَ صخورٍ من النوع (ب) في أحد المواقع، ووُجِد النوعُ (ب) أسفلَ النوع (ج) في موقع آخَر، فلنا أن نستنتج إذن التتابُعَ أ – ب – ج، حتى لو لم نعثر مطلقًا على النوعين (أ) و(ج) في مكان واحد.

| حقبة | العصر | الفترة | منذ |
|---|---|---|---|
| | العصر الرباعي | فترة الهولوسين | ١٠ آلاف عام |
| | | فترة البليستوسين | ٢ مليون عام |
| | | فترة البليوسين | ٧ ملايين عام |
| | | فترة الميوسين | ٢٦ مليون عام |
| حقبة الحياة الحديثة | العصر الثلثي | فترة الأوليجوسين | ٣٨ مليون عام |

| حقبة | العصر | الفترة | منذ |
|---|---|---|---|
| | | فترة الأيوسين | ٥٤ مليون عام |
| | | فترة الباليوسين | ٦٤ مليون عام |
| حقبة الحياة الوسطى | العصر الطباشيري | | ١٣٦ مليون عام |
| | العصر الجوراسي | | ١٩٠ مليون عام |
| | العصر الترياسي | | ٢٢٥ مليون عام |
| حقبة الحياة القديمة | العصر البرمي | | ٢٨٠ مليون عام |
| | العصر الفحمي | | ٣٤٥ مليون عام |
| | العصر الديفوني | | ٤١٠ ملايين عام |
| | العصر السيلوري | | ٤٤٠ مليون عام |
| | العصر الأوردوفيشي | | ٥٣٠ مليون عام |
| | العصر الكمبري | | ٥٧٠ مليون عام |

هذا الاستخدام المنهجي لهذه الطريقة مكَّنَ جيولوجيي القرن التاسع عشر من تحديد الأقسام الكبرى للزمن الجيولوجي (شكل ٤-١)، وهذه الأقسامُ توفِّر سِجِلًّا زمنيًّا نسبيًّا، وليس مطلقًا؛ إذ تتطلَّب التواريخُ المطلقة طُرُقًا من أجْل المُعايَرَة الدقيقة لمعدل حدوث العمليات ذات الصلة، وهو أمر يصعب للغاية عملُه بأي مستوًى من الدقة. إن العمليات الداخلة في تكوين المشهد الطبيعي بطيئة للغاية، وبالتبعية تكون عمليةُ تراكُمِ الرواسب بطيئةً بالمِثْل؛ وعلى نحوٍ مشابه، تحدث عمليةُ ارتفاع الأرض — حتى في أكثر مناطق تكوُّن الجبال نشاطًا، كالإنديز — بمعدلٍ يبلغ كسرًا بسيطًا من المتر كلَّ عام في المتوسط. وفي ضوء وجودِ الصخور الرسوبية ذات التكوين نفسه، الواقعة على عمق كيلومترات عديدة في أجزاء كثيرة من العالم، والأدلةِ على أن تراكماتٍ مماثِلَةً تعرَّضَتْ للتآكل؛ سريعًا ما أُدرِكتْ ضرورةُ وضْعِ نطاقٍ زمني لا يقلُّ عن عشرات الملايين من الأعوام لعُمْر الأرض، وهو ما يتعارض مع التأريخ الزمني الوارد في الإنجيل. وقد اقترح لايل على هذا الأساس أن العصر الثلثي استمر لنحو ٨٠ مليون عام، وأن العصر الكمبري وقع منذ ٢٤٠ مليون عام.




شكل ٤-١: الأقسام الكبرى للزمن الجيولوجي. الجزء العلوي يُظهِر الأقسامَ بدايةً من العصر الكمبري وصاعدًا، وفيها تمَّ العثورُ على معظم الحفريات (هذا يبلغ أقلَّ من ثُمْن الزمن المنقضي منذ تكوُّنِ الأرض). الجزء السفلي يُظهِر الأحداثَ الكبرى التي وقعت عبر تاريخ الأرض.

عارَض الفيزيائي البارز لورد كلفن مثل هذا النطاق الزمني الطويل، على أساس أن معدل برودة الأرض التي كانت منصهرةً في بدايتها، من شأنه أن يجعل لُبَّ الأرض أبردَ كثيرًا ممَّا هو عليه بالفعل، لو أن الأرض قد تكوَّنَتْ منذ أكثر من نحو ١٠٠ مليون عام مضَتْ. كانت حسابات كلفن صائبةً وفْقَ فيزياء عصره، إلا أنه بنهاية القرن التاسع عشر اكتُشِف التحلُّل الإشعاعي للعناصر غير المستقرة، كاليورانيوم، إلى مشتقات أكثر

استقرارًا. وعملية التحلل هذه تكون مصحوبةً بإطلاق طاقةٍ تكفي لإبطاء معدل برودة الأرض إلى القيمة التي تتفق مع التقديرات الحالية لعُمْر الأرض.

أيضًا قدَّم التحلُّلُ الإشعاعي طرقًا جديدة موثوقًا بها لتحديد أعمار العينات الصخرية؛ فذرات العناصر المُشعَّة لها احتماليةٌ ثابتة للتحلُّل كلَّ عام إلى عناصر وليدة أكثر استقرارًا، ويصاحب ذلك انطلاقَ إشعاع. عند تكوُّن إحدى الصخور، يمكن افتراض أن العنصر المعنيَّ خالص؛ ومِن ثَمَّ لو قِيسَتْ نسبةُ العنصر الوليد في العينة، لَكان من الممكن تقدير الزمن المنقضي منذ تكوُّن الصخرة، وذلك بمعرفة معدل عملية التحلُّل كما تحدَّد من واقع التجارب. ثمة عناصر مختلفة مفيدة في عملية تحديد تاريخ صخور العصور المختلفة، وقد أمدَّتْنا عملياتُ تحديد عُمْر الصخور المنتمية إلى عصورٍ جيولوجيةٍ مختلفة بواسطة هذا الأسلوب؛ بالتواريخ المقبولة اليومَ. وبينما يتمُّ تنقيح الطرق وتعديل التواريخ على نحوٍ مستمر، فإن النطاق الزمني العام الذي تُشِير إليه واضح للغاية (الشكل ٤-٢)، وهو يحدِّد مقدارًا كبيرًا للغاية من الزمن — يمكن استيعابُه بالكاد — كي يحدث فيه التطوُّرُ البيولوجي.

## السجل الحفري

السجل الحفري هو مصدرنا الوحيد للمعلومات بشأن تاريخ الحياة، ومن أجل تفسير هذا السجل بشكل صحيح، يجب فهْمُ الكيفيةِ التي تكوَّنت بها الحفريات، والكيفيةِ التي يدرس العلماءُ بها تلك الحفريات. حين يموت نبات أو حيوان أو ميكروب، تتحلَّل الأجزاء الرخوة من جسده بسرعة. فقط في البيئات غير المعتادة، مثل المناخ الصحراوي الجاف أو المواد الحافظة الموجودة في قطعة من الكهرمان، تكون الميكروباتُ المسئولةُ عن عملية التحلل عاجزةً عن تفتيت الأجزاء الرخوة؛ لقد تمَّ العثورُ بالفعل على حالات استثنائية حُفِظت فيها أجزاءٌ رخوة، في بعض الأحيان لعشرات الملايين من السنوات في حالة الحشرات المحبوسة داخل مادة الكهرمان، لكنها تمثِّل الاستثناءَ لا القاعدة. وحتى البنى العظمية، مثل مادة الكيتين الصلبة التي تُغطِّي أجسادَ الحشرات والعناكب، أو عظام الفقاريات وأسنانها، تتحلَّلُ في نهاية المطاف، إلا أن معدل تحلُّلِها البطيء يقدِّم فرصةً كي تتخلَّلها المعادنُ، وفي النهاية تُستبدَل بالمادة الأصلية نسخةٌ معدنية طبق

الأصل (أحيانًا يحدث هذا للأجزاء الرخوة أيضًا)؛ ومن الممكن أيضًا أن تصنع قالبًا لأشكالها بينما تترسب المعادن حولها.

أكثر الأماكن التي يُرجَّح فيها حدوثُ التحفير هي البيئات المائية؛ حيث يحدث تراكُمٌ للرواسب الصخرية والمعدنية في قيعان البحار والبحيرات ومصبَّات الأنهار، حِينَها يُمكِن للبقايا التي تَغرَق للقاع أن تتحوَّل إلى حفريات، بالرغم من أن فُرَص حدوث ذلك لأي كائن بعينه ضئيلةٌ للغاية. ولهذا السبب يتَّسِم السجلُ الحفري بالانحياز؛ فالكائنات البحرية التي تعيش في البحار الضحلة؛ حيث تتكوَّن الرواسبُ باستمرار، لها أفضل سِجلٍّ حفري، بينما الكائنات الطائرة لها أسوأ سِجِلٍّ. علاوةً على ذلك، قد تتعرَّض عمليةُ تراكُمِ الرواسب للمقاطعة، مثلًا بسبب تغيُّرٍ في المناخ أو بسبب ارتفاع قاع البحر. ليس لدينا أيُّ سجل حفري للعديد من الكائنات، وبالنسبة إلى كائنات أخرى يتعرَّض السجل للمقاطعة مراتٍ عدةً.

ثمة مثال معبِّر عن المشكلات التي يُسبِّبها عدمُ اكتمال السجل الحفري، وهو خاص بشوكيات الجوف؛ وشوكياتُ الجوف نوع من الأسماك العظمية لها زعانف لحمية، وهي مرتبطة بأسلاف أول الفقاريات الأرضية. كانت شوكيات الجوف موجودة بوفرة في العصر الديفوني (منذ حوالي ٤٠٠ مليون عام)، لكن مع الوقت قلَّ عددها؛ وتعود آخِرُ حفريات شوكيات الجوف إلى ٦٥ مليون عام مضت، وكان يُظَنُّ أن هذه الرتبة قد انقرضَتْ تمامًا، لكن عام ١٩٣٩ أمسَكَ صيادو أسماكٍ في جزر كومورو قبالةَ السواحل الجنوبية الغربية لقارة أفريقيا، بسمكة غريبة الشكل، واتضح أنها من شوكيات الجوف؛ ومِن ثَمَّ تمكَّن العلماء من دراسة عادات شوكيات الجوف الحية، واكتُشِف تجمُّعٌ جديد لها في إندونيسيا. من المؤكد أن شوكيات الجوف قد ظلَّتْ باقيةً على نحو متصل عبر فترات طويلة من الزمن، لكنها لم تخلِّف سجلًّا حفريًّا بسبب قلة أعدادها وعيشها على أعماق كبيرة.

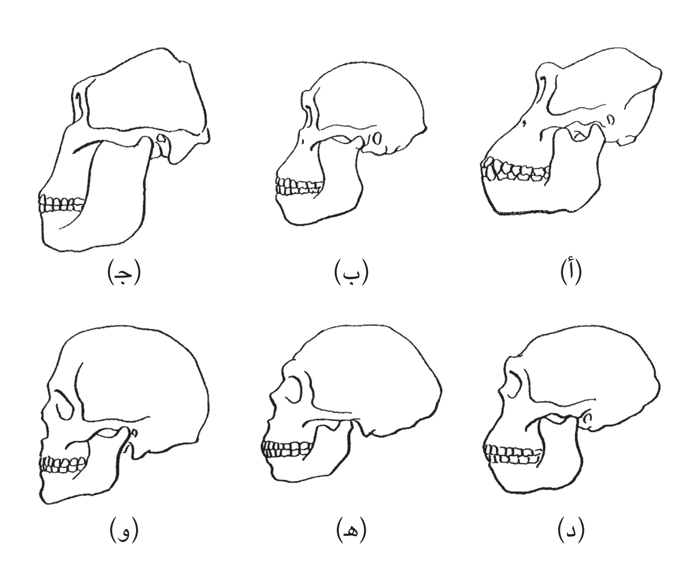
تعني الفجواتُ الموجودة في السجل الحفري أنه من النادر أن نمتلك سلسلةً طويلة متواصلة من البقايا التي تبيِّن التغيُّراتِ المتواصلةَ المتوقَّعة بموجب فرضية التطور. وفي أغلب الحالات، تَظهَر مجموعاتٌ جديدة من الحيوانات أو النباتات للمرة الأولى في السجل الحفري دون أن تربطها أيُّ رابطة بالأشكال القديمة؛ وأشهر مثال لذلك هو «الانفجار الكمبري»، وهو المصطلح الذي يشير إلى حقيقة أن أغلب المجموعات الكبيرة

من الحيوانات ظهرَتْ للمرة الأولى على صورة حفريات تعود للعصر الكمبري، ما بين ٥٥٠ و٥٠٠ مليون عام مضت (سنناقش هذا الأمر ثانيةً في الفصل السابع).

ومع هذا فقد ذهب داروين، بلغة بليغة، في كتابه «أصل الأنواع»، إلى أن الملامح العامة للسجل الحفري تقدِّم أدلةً قوية تؤيِّد التطوُّرَ، وقد عزَّزَتْ الاكتشافاتُ التي تحقَّقت على يد علماء الحفريات منذ أيامه ذلك الرأيَ؛ ففي المقام الأول، اكتُشِفت أمثلة عديدة لأشكال وسيطة، تربط بين مجموعات كان يُظَنُّ سابقًا أن فجواتٍ لا يمكن رأْبُها تَفصِل بينها. وربما تُعَدُّ حفريةُ الطائر–الزاحف «أركيوبتركس»، المكتَشَفة بُعَيْدَ نشْرِ كتاب «أصل الأنواع»، هي أشهر تلك الأمثلة. إن حفريات الأركيوبتركس نادرةٌ (فلا يوجد منها سوى ستِّ عينات)، وهي تأتي من الحجر الجيري الجوراسي البالغ عمره نحو ١٢٠ مليون عام، الذي ترسَّبَ في بحيرةٍ كبيرةٍ في ألمانيا. هذه الكائنات لها سمات متباينة، بعضها يشبه تلك السمات الخاصة بالطيور الحديثة، مثل الأجنحة والريش، والبعض الآخَر يشبه تلك الخاصة بالزواحف، مثل الفم ذي الأسنان (بدلًا من المناقير) والذيل الطويل. ثمة تفاصيل عديدة بشأن هياكلها العظمية لا يمكن تمييزها عن تلك الخاصة بمجموعة الديناصورات المعاصرة لها، لكن الأركيوبتركس يختلف عنها؛ إذ من الواضح أن بمقدوره الطيران. اكتُشِفت حفريات أخرى تربط الطيورَ بالديناصورات، وقد ثبت مؤخَّرًا أن الديناصورات ذات الريش كانت موجودةً قبل الأركيوبتركس. وتتضمَّن الحفرياتُ الوسيطة الأخرى حفرياتِ ثديياتٍ من فترة الأيوسين (نحو ٦٠ مليون عام مضَتْ)، لها أطراف أمامية وأطراف خلفية مختزلة مكيَّفة مع السباحة؛ وهذه الأنواعُ الوسيطة تربط الحيتان المعاصرة بحيوانات تنتمي إلى مجموعة العواشب المشقوقة الحافر التي تتضمَّن البقر والأغنام.

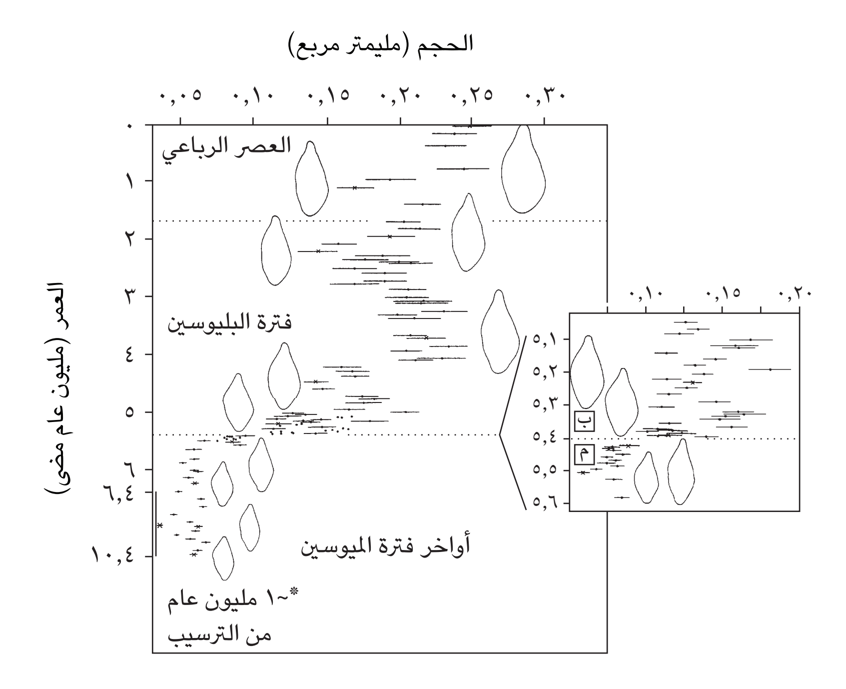
البشر مثال رائع للفجوات الموجودة في السجل الحفري، التي تُملَأ مع إجراء المزيد من الأبحاث. وقتَ أن نشر داروين كتابَه عن التطور البشري بعنوان «أصل الإنسان» عام ١٨٧١، لم تكن توجد أيُّ حفريات تربط القِرَدة بالبشر، وقد ذهب داروين على أساس التشابُهات في الشكل إلى أن البشر على صلةِ قرابةٍ وثيقة بالغوريلا والشمبانزي، وأنهم من ثَمَّ نشئوا في أفريقيا من سلفٍ هو أيضًا سلفُ هذه القِرَدة. ومنذ ذلك الوقت اكتُشِفت سلسلةٌ كاملة من البقايا وأُرِّخَتْ بدقةٍ بواسطة الطرق المذكورة من قبلُ، ولا يزال يَجرِي العثور على حفريات جديدة. وكلما كانت هذه الحفريات قريبةً من وقتنا الحالي، كانت أكثرَ شبهًا بالإنسان الحديث (الشكل ٤-٢)؛ وأبعدُ الحفريات التي يمكن نسبتها بوضوح

إلى الإنسان العاقل «هومو سابينز»، يعود تاريخها إلى بضع مئات الآلاف من الأعوام فحسب. وبما يتفق واستدلالات داروين، ربما وقع التطورُ البشري المبكر في أفريقيا، ويبدو مرجَّحًا أن أقرباءنا قد دخلوا قارة أوراسيا للمرة الأولى منذ نحو مليون ونصف المليون عام.




شكل ٤-٢: جماجم بعض أسلاف البشر وأقربائهم. (أ) أنثى غوريلا. (ب) و(ج) حفريتان لنوعين مختلفين من أحد أوائل أقرباء البشر؛ «أسترالوبيثكس»، منذ نحو ٣ ملايين عام مضت. (د) حفرية نوع وسيط بين الأسترالوبيثكس والإنسان الحديث يُسمَّى الإنسان المنتصب؛ «هومو إريكتوس»، منذ نحو مليون ونصف مليون عام مضت. (هـ) حفرية إنسان نياندرتال؛ «هومو نياندرتالينسيس»، منذ نحو ٧٠ ألف عام مضت. (و) الإنسان الحديث؛ «هومو سابينز».

هناك أيضًا حالات فيها تتابعاتٌ زمنية متصلة بالكامل تقريبًا من الحفريات، وفيها يبدو مؤكَّدًا أن لدينا سجلًّا للتغيُّر في سلالة فردية آخِذة في التطور. أفضلُ الأمثلة تأتينا من الدراسات التي أُجرِيت على نتائج عمليات الحفر في الرواسب الموجودة في قاع البحر، والتي يمكن من خلالها استخراج أعمدة صخرية طويلة؛ يسمح هذا بفصلٍ زمني




شكل ٤-٣: التغيُّر التطوري التدريجي في سلسلة من الحفريات. يُظهِر الشكلُ متوسطاتِ ونطاقاتِ أحجام الجسم في عينات لحفريات أحد المنخربات (جلوبوروتاليا توميدا)، وهو حيوان بحري صدفي وحيد الخلية. يتغيَّر الحجم تدريجيًّا في هذه السلالة، باستثناء فجوتين كبيرتين. عند الحد الفاصل بين أواخر فترة الميوسين وفترة البليوسين، تُظهِر مجموعةٌ أكثرُ تفصيلًا من الحفريات (الصورة الجانبية المكبرة) أن الفجوة المرصودة مع المجموعة التقريبية للحفريات، تعكس بالكامل تقريبًا وجودَ حِقْبة من التغيُّر السريع للغاية؛ نظرًا لأن نطاقات أغلب العينات المتعاقِبة يتداخل بعضها مع بعض. وبالنسبة إلى الفجوة الموجودة منذ نحو ٤ ملايين عام مضت، لا توجد حاليًّا بياناتٌ حفريةٌ.

على نطاق دقيق للغاية بين العينات المتعاقِبة للكائنات التي تُكوِّن هياكلُها المتحجِّرة التي لا تُحصَى جسمَ الصخرة. وتمكِّنُنا القياساتُ الدقيقة لأشكال هياكل الكائنات، مثل المنخربات التي هي حيوانات بحرية وحيدة الخلية، من توصيف كلٍّ من متوسطات ومستويات التجمعات المتعاقبة على امتداد فترة طويلة من الزمن (الشكل ٤-٣).

وحتى لو لم توجد كائنات وسيطة متدرِّجة في السجل الحفري، فإن الملامح العامة للسجل لا تكاد تُفهَم إلا في ضوء التطور. وبالرغم ممَّا يتَّسِم به السجل الحفري قبل العصر الكمبري من تشظٍّ، فإنه توجد أدلة على وجود بقايا بكتيريا وكائنات وحيدة الخلية مرتبطة بها تعود إلى أكثر من ثلاثة ملايين ونصف المليون عام. وبعد ذلك بزمن كبير، توجد بقايا لخلايا (حقيقية النوى) أكثر تقدُّمًا، لكن لا يوجد دليل حتى الآن على وجود كائنات عديدة الخلايا. والكائنات المؤلَّفة من تجمعات بسيطة من الخلايا تَظهَر فقط منذ حوالي ٨٠٠ مليون عام، في زمن الأزمة البيئية التي كانت خلالها الأرضُ مغطَّاةً بالكامل تقريبًا بالجليد. وفيما بين ٧٠٠ و٥٥٠ مليون عام مضت، توجد أدلة على وجود حياة لحيوانات عديدة الخلايا رخوة الجسم.

وكما ذكرنا من قبلُ، تصير بقايا الحيوانات المرتبطة بالهياكل الصلبة وفيرةً فقط في الصخور التي تعود إلى العصر الكمبري، منذ حوالي ٥٥٠ مليون عام مضت. وفي نهاية العصر الكمبري، منذ حوالي ٥٠٠ مليون عام مضت، توجد أدلة على وجود كل مجموعات الحيوانات الكبرى تقريبًا، بما فيها الفقاريات الشبيهة بالأسماك التي تفتقر للفكوك، وتشبه الجلكيات الحديثة.

حتى ذلك العصر كانت صور الحياة كافة مرتبطةً بالترسيبات البحرية، وكانت بقايا النباتات الوحيدة هي الطحالب، التي تفتقر للأوعية التي تستخدمها النباتاتُ البرية العديدة الخلايا لنقل السوائل. توجد أدلة على وجود حياة في المياه العذبة منذ ٤٤٠ مليون عام، تتبعها حفريات أبواغ تعني ضمنًا وجودَ أوائل النباتات البرية، كما تظهر أسماك شبيهة بالقرش في البحار. في العصر الديفوني (٤٠٠–٣٦٠ مليون عام مضت)، تصير بقايا كائنات المياه العذبة والكائنات البرية أكثر شيوعًا وتنوعًا بكثير. وتوجد أدلة على وجود حشرات وعناكب وعُث ومئويات أرجل بدائية، علاوة على نباتات وعائية وفطريات بسيطة. تصير الأسماك الفكية ذات الهياكل العظمية أكثر شيوعًا، بما فيها الأسماك اللَّحْمِيَّة الزعانف الشبيهة في بنيتها بأول البرمائيات الشبيهة بالسمندل التي تَظهَر عند نهاية العصر الديفوني؛ وهذه هي أول الفقاريات الأرضية.

خلال القسم التالي من السجل الجيولوجي — العصر الفحمي (٣٦٠–٢٨٠ مليون عام مضت) — تصير أشكال الحياة البرية وفيرةً ومتنوعةً. إن ترسيبات الفحم — التي منها جاء اسم هذا العصر — هي البقايا المتحجرة للنباتات الشبيهة بالأشجار التي كانت تنمو في المستنقعات الاستوائية، لكن هذه النباتات مشابِهةٌ للسراخس ونباتات ذيل

الحصان المعاصرة، ولا تربطها علاقةٌ بالأشجار المتساقطة الأوراق أو الدائمة الخضرة الحالية. توجد بقايا الزواحف البدائية — أول الفقاريات التي تستقل تمامًا في معيشتها عن الماء — عند نهاية العصر الفحمي. وفي العصر البرمي (٢٨٠–٢٥٠ مليون سنة مضت)، يوجد تنوُّع عظيم للزواحف، وبعض هذه الزواحف له ملامح تشريحية شبيهة بدرجة كبيرة بملامح الثدييات (الزواحف الشبيهة بالثدييات)، ويَظهَر في هذا الوقت بعض مجموعات الحشرات الحديثة، كالبق والخنافس.

ينتهي العصر البرمي بأكبر مجموعة من الانقراضات يمكن رؤيتها في السجل الحفري، فقد اختفى فيها بالكامل بعضُ المجموعات التي كانت مهيمنةً فيما سبق، كثلاثيات الفصوص، ومُحِيت فيها مجموعات أخرى بشكل شبه تام. وخلال التعافي الذي تلا ذلك، تَظهَر مجموعة متنوعة جديدة من الأشكال، سواء أكانت على الأرض أم في البحر؛ ففي العصر الترياسي (٢٥٠–٢٠٠ مليون سنة مضت) تظهر نباتات شبيهة بشجر الصنوبر والسيكاد الحديث، وتظهر أيضًا الديناصورات والسلاحف والتماسيح البدائية، وعند نهاية ذلك العصر تمامًا نجد أول ظهور للثدييات الحقيقية؛ وهذه الثدييات يميِّزها عن سابقاتها أنها تمتلك فكًّا سفليًّا مكوَّنًا من عظمة واحدة متصلة بالجمجمة مباشَرةً (العظام الثلاث التي تشكِّل هذه الصلة في جماجم الزواحف تطوَّرَتْ إلى العظام الداخلية الصغيرة الموجودة في آذان الثدييات، انظر الفصل الثالث). كما تظهر أسماك عظمية شبيهة بالأشكال الحديثة في البحر. وفي العصر الجوراسي (٢٠٠–١٤٠ مليون عام مضت)، تتنوع الثدييات بدرجةٍ ما، لكن لا تزال الزواحف — خاصةً الديناصورات — هي المهيمنة على الحياة الأرضية. تظهر كذلك الزواحف الطائرة والأركيوبترِكس، وللمرة الأولى يظهر الذباب والأرضات، والأمر عينه ينطبق على السرطانات وجراد البحر. فقط في العصر الكريتاسي (١٤٠–٦٥ مليون عام مضت) تطوَّرَتِ النباتات المزهرة، وهي آخِر مجموعات الكائنات الكبرى تطورًا من الناحية الزمنية، وأيضًا يمكن العثور على كل مجموعات الحشرات الحديثة الكبرى بحلول ذلك الوقت. تظهر الثدييات الجرابية (الجرابيات) في منتصف العصر الكريتاسي، ويمكن العثور على أشكال شبيهة بالثدييات المشيمية الحديثة قرب نهاية ذلك العصر. لا تزال الديناصورات وفيرةَ العدد، لكنَّ عددَها يتناقص في نهاية ذلك العصر.

ينتهي العصر الكريتاسي بأشهر أحداث الانقراض الكبرى؛ ذلك الحدث المرتبط باصطدام كويكب بمنطقةِ شبهِ جزيرة يوكاتان بالمكسيك؛ اختفت كلُّ الديناصورات

(عدا الطيور)، إلى جانب العديد من أنواع الكائنات التي كانت شائعةَ الوجود على الأرض أو في البحار. يلي ذلك العصرُ الثلثي، الذي يمتدُّ حتى بداية العصر الجليدي الكبير، منذ نحو مليونَيْ عام مضت. خلال القسم الأول من العصر الثلثي، بين ٦٥ و٣٨ مليون عام مضت، تظهر المجموعات الرئيسية من الثدييات المشيمية؛ في البداية، تكون هذه الثدييات شبيهةً بآكِلات الحشرات الحديثة كالذباب، لكن بعضها يصير متمايِزًا على نحو كبير بنهاية تلك الفترة (الحيتان والخفافيش على سبيل المثال). أغلب المجموعات الرئيسية للطيور موجودة، علاوة على الأنواع الحديثة من اللافقاريات، وكل مجموعات النباتات المزهرة عدا الكلأ، وتوجد أيضًا بوفرة أسماكٌ عظمية من النوع الحديث تقريبًا. وبين ٣٨ و٢٦ مليون عام مضت، تظهر المراعي، ويرتبط بها ظهورُ حيوانات رعي شبيهة بالخيول حوافرُها ذات ثلاثة أصابع (بدلًا من إصبع واحد كما في الحصان الحديث)، وتَظهَر أيضًا القِرَدة البدائية في هذه الفترة. وبين ٢٦ و٧ ملايين عام مضت، تنتشر مروج المراعي في أمريكا الشمالية، ونجد الخيول ذات الأصابعِ القصيرة الجانبية والأسنانِ ذات التيجان العالية المتكيفة من أجْل الرعي. يظهر العديد من ذوات الحوافر، كالخنازير والغزلان، كما تَظهَر الجِمَال والأفيال، وتصير القِرَدةُ والسعادين أكثر تنوُّعًا، خاصةً في أفريقيا. وبين ٧ ملايين ومليونَيْ عام مضت، تتسم الحياةُ البحرية بملمَحٍ حديث في الأساس، بالرغم من أن العديد من الأنواع التي كانت تعيش وقتَها صارت الآن منقرضةً. تَظهَر أولى البقايا الخاصة بكائنات ذات ملامح بشرية مميزة في هذه الفترة. وتشهد نهايةُ العصر الثلثي، بين مليونَيْ عام مضت و١٠ آلاف عام مضت، سلسلةً من العصور الجليدية، وأغلب الحيوانات والنباتات اتخذت وقتَها شكلَها الحديث. وبين نهاية العصر الجليدي منذ ١٠ آلاف عام والوقت الحاضر، صار البشرُ الحيوانَ الأرضي المهيمن، وانقرضت أنواعٌ عديدة من الثدييات الضخمة. هناك بعضُ الأدلة الأحفورية المؤيِّدة للتغيُّر التطوري على مدار هذه الفترة، مثل تطور نُسَخ قِزْمة من العديد من أنواع الثدييات الضخمة على الجُزُر.

يوحي إذن السجل الحفري بأن الحياة نشأت في البحار منذ ما يزيد عن ثلاثة مليارات عام، وأنه لأكثر من مليار عام كانت الكائناتُ الوحيدةُ الخلية القريبة بالبكتيريا هي وحدها الموجودة على الكوكب، وهذا تحديدًا ما نتوقَّعه وفقَ نموذج تطوري؛ فتطوُّرُ الآلية المطلوبة لترجمة الشفرة الوراثية إلى تتابعات بروتينية، بل التنظيم المعقَّد أيضًا حتى لأبسط خلية، من المؤكَّد أنه تطلَّبَ العديدَ من الخطوات، وتفاصيلُ هذه الخطوات

تستعصي على خيالنا بشكل شبه تام، كما أن الظهور المتأخر في السجل الحفري لأي أدلة واضحة على الخلايا الحقيقية النوى، بما هي عليه من تنظيم أكثر تعقيدًا مقارَنةً ببدائيات النوى، يتفق هو أيضًا مع التطور. والأمر عينه ينطبق على الكائنات العديدة الخلايا، التي يتطلَّب تطورُها من خليةٍ وحيدةٍ آلياتِ نقلِ إشارةٍ معقَّدةً من أجل التحكم في النمو والتمايز؛ وهذه الآليات يستحيل أن تكون قد تطوَّرَتْ قبل أن توجد أشكال الحياة الوحيدة الخلية. وما إنْ تطوَّرَتِ الأشكال البسيطة العديدة الخلايا، يكون مفهومًا كيف أنها تنوَّعَتْ بسرعة إلى أشكال عديدة، متكيِّفة مع الأنماط المختلفة للحياة، كما حدث في العصر الكمبري. وفي الفصل التالي سنناقش موضوعَيِ التكيُّف والتنوُّع.

إن حقيقة كوْنِ الحياة بحريةً بشكل حصري لفترة هائلة من الوقت تصير مفهومةً هي أيضًا من منظور تطوري؛ ففي أوائل تاريخ الأرض، تُظهِر الأدلةُ الجيولوجية أنه كان هناك القليلُ من الأكسجين في الغلاف الجوي؛ ومن ثَمَّ أَدَّى غيابُ الحماية من الإشعاع فوق البنفسجي بواسطة طبقة الأوزون — التي تتكوَّن من الأكسجين — إلى منع ظهور الحياة على البر أو حتى في المياه العذبة، وما إنْ تراكَمَ مقدارٌ كافٍ من الأكسجين نتيجةً لأنشطة التمثيل الضوئي التي قامَتْ بها أشكالُ البكتيريا والطحالب المبكرة، حتى أُزِيل هذا العائقُ، وانفتَحَ الباب أمام غزو البر. وهناك أدلة على وجود زيادة في مستويات الأكسجين في الغلاف الجوي خلال الفترة السابقة على العصر الكمبري، وهو الأمر الذي ربما سمح بتطوُّر حيواناتٍ أكبر وأكثر تعقيدًا. وعلى نحو مشابه، يصير ظهورُ حفريات الحشرات الطائرة والفقاريات بعد بزوغ الحياة على البر أمرًا منطقيًّا؛ لأنه من غير المرجح أن تستطيع حيواناتٌ طائرةٌ حقيقيةٌ التطوُّرَ من أشكال حياة مائية خالصة.

إن الظاهرة المتكررة المتمثِّلة في ظهور أشكال حياة متنوعة ووفيرة، متبوعة بانقراضها الكلي (كما في حالة ثلاثيات الفصوص والديناصورات)، أو اختزالها إلى شكل واحد أو بضعة أشكال قليلة العدد باقية (كشوكيات الجوف)؛ تصير منطقيةً أيضًا في ضوء التطوُّر، الذي لا تملك آلياتُه قدرةً على الاستبصار، وتعجز عن ضمان قدرةِ الكائنات الناتجة على البقاء على قيد الحياة في وجه تغيُّرات بيئية كبرى. وعلى نحو مشابه، التنوعُ السريع للمجموعات بعد استعمار موئلٍ جديدٍ (كما في حالة غزو البر)، أو بعد انقراض مجموعة منافِسة مهيمِنة (كما في حالة الثدييات بعد اختفاء الديناصورات)، هو أمر متوقَّع وفقَ مبادئ التطور.

إن تفسير السجل الحفري في ضوء المعرفة البيولوجية يتبع إذن مبدأَ الوتيرة الواحدة الذي يطبِّقه الجيولوجيون على تاريخ بنية كوكب الأرض، وربما تكون الأدلةُ الحفرية قد أظهرَتْ أنماطًا تُكذِّب نظريةَ التطور، لكنْ يُروَى عن عالِم الوراثة والمناصِر الكبير لنظرية التطوُّر جيه بي إس هالدان، أنه أجاب عن سؤالٍ بشأن الاكتشاف الذي يمكن أن يجعله يتخلَّى عن إيمانه بنظرية التطوُّر، بقوله: «أرنب من وقت يسبق العصر الكمبري.» وإلى الآن لم يتمَّ اكتشافُ حفريةٍ مثل هذه.

## أنماط مكانية

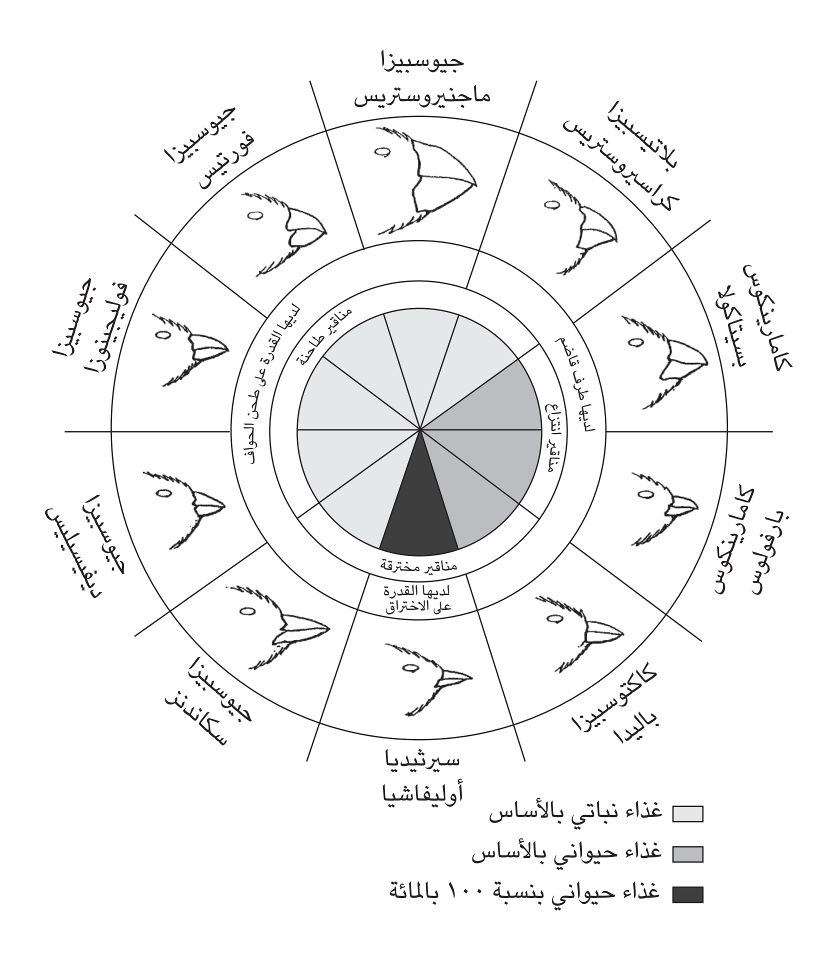
ثمة مجموعة أخرى من الحقائق تصير منطقيةً فقط في ضوء التطور، وهي تأتي من توزيع الكائنات الحية عبر المكان، وليس الزمان، على النحو الذي وصفه داروين في فصلين من الفصول الخمسة عشر التي تؤلِّف كتاب «أصل الأنواع». من أكثر الأمثلة بروزًا على هذا الحياةُ النباتية والحيوانية للجزر المحيطية، مثل جزر جالاباجوس وهاواي، التي تُبيِّن الأدلةُ الجيولوجية أنها تكوَّنَتْ بفعل النشاط البركاني ولم تكن متصلةً قطُّ بأية قارة. وفقَ نظريةِ التطور، الكائناتُ التي تقطن مثل هذه الجزر اليومَ لا بد أنها منحدرةٌ من أفرادٍ كانوا قادرين على عبور المسافات الشاسعة، التي تفصل الجزر المتكوِّنة حديثًا عن أقرب أراضٍ مسكونة. وهذا يضع قيودًا عدة على ما قد نجده؛ أولًا: صعوبة استعمار منطقة نائية متكوِّنة حديثًا تعني أن عددًا قليلًا فقط من الأنواع سيكون قادرًا على تثبيت نفسه. ثانيًا: وحدها أنواع الكائنات التي لها سماتٌ تمكِّنُها من عبور مئات أو آلاف الأميال عبر المحيط، ستتمكَّن من تثبيت نفسها. ثالثًا: حتى في المجموعات الممثَّلة، ستكون الأنواعُ الموجودة معرَّضةً لعنصرِ عشوائيةٍ مرتفعٍ، وذلك بسبب عدد الأنواع الصغير الذي يصل إلى تلك الجزر. وأخيرًا: سيُنتِج التطورُ على مثل هذه الجزر النائية أشكالًا عديدةً لا يمكن أن نجدها في مكان آخَر.

تؤكِّد الأدلة، بشكل مُبهِر، صحةَ هذه التوقعات؛ فالجزر المحيطية تميل بالفعل إلى أن تكون بها أنواعٌ قليلة من أي مجموعة رئيسية، وذلك مقارَنةً بالقارات أو الجزر القريبة من السواحل والتي لها مناخ مشابه. تختلف أنواعُ الكائنات الموجودة في الجزر المحيطية، قبل وصول البشر إليها، اختلافًا تامًّا عن الأنواع الموجودة في أي مكانٍ آخَر؛ على سبيل المثال: الزواحف والطيور تكون في المعتاد موجودة، بينما تكون الثدييات والبرمائيات غائبة؛ ففي نيوزيلندا، لم تكن هناك أي ثدييات برية قبل أن يقطنها

البشر، وإن كان هناك نوعان من الخفافيش بها. هذا يعكس قدرةَ الخفافيش على عبور مساحات شاسعة من المياه المالحة. كما أن الانتشار الواسع لأنواع عديدة بعد استيطان البشر يبيِّن بوضوحٍ أن الظروفَ المحلية لم تكن هي ما يمنع هذه الأنواعَ من ترسيخ نفسها في هذه المناطق، لكن حتى بين الأنواع الرئيسية من الحيوانات والنباتات الموجودة، عادةً ما نجد مجموعاتٍ غائبةً بالكامل، بينما تُمثَّل مجموعاتٌ أخرى بما لا يتناسب وحجمَها. وهكذا يوجد على جزر جالاباجوس ما يربو فقط على العشرين نوعًا من الطيور البرية، منها ١٤ نوعًا من الشرشوريات؛ تلك الشرشوريات الشهيرة التي وصفها داروين في ملخص سفرياته حول العالم على متن سفينة بيجل. هذا مخالف تمامًا للوضع في المناطق الأخرى، التي تشكِّل فيها الشرشورياتُ نسبةً بسيطة للغاية من الطيور الأرضية، وهذا الوضع تحديدًا هو ما يتوقَّعه المرءُ لو كان هناك عددٌ صغير من أنواع الطيور التي استوطنَتِ المنطقةَ في الأساس، وكان أحدها نوعًا من الشرشوريات صار سلفَ تلك الأنواع الموجودة حاليًّا.

مثلما تتنبَّأ هذه النظرة، تُقدِّم الجُزُرُ المحيطية أمثلةً عديدة للأشكال التي تتفرَّدُ هذه الجزرُ بها، لكنها كذلك تملك أوجهَ شبهٍ مع الأنواع الموجودة على البر الرئيسي؛ على سبيل المثال: ٣٤ بالمائة من أنواع النباتات الموجودة في جزر جالاباجوس غير موجودة في أي مكان آخَر في العالم. وتُظهِر شرشوريات داروين مقدارًا من التنوُّع، من حيث أحجام المناقير وأشكالها، أكبرَ كثيرًا ممَّا هو موجود في المعتاد بين الشرشوريات (وهي في المعتاد عصافيرُ آكِلةٌ للبذور لها مناقير كبيرة عميقة)، وهذه المناقير من الواضح أنها متكيِّفة بحيث تُلائِم أنماطًا مختلفة من عمليات جمع الغذاء (الشكل ٤-٤). بعض هذه الأنماط غير معتادٍ بدرجة كبيرة، مثل قيام الشرشور الأرضي الحادِّ المنقار من النوع «جيوسبيزا ديفيسيليس» بنقْرِ مؤخرةِ الطيور البحرية المعشِّشة وشُرب دمائها، بينما يستخدم الشرشورُ نقَّارُ الخشب من النوع «كاكتوسبيزا باليدا» الأغصانَ أو أشواكَ الصبار في استخراج الحشرات من الخشب الميت. بل يمكننا العثور أيضًا على أمثلة أكثر غرابةً على التطور الجامح في مجموعات أخرى من الجزر المحيطية؛ على سبيل المثال: عددُ أنواع ذبابة الفاكهة في هاواي يتجاوزُ العددَ الموجود في باقي أنحاء العالم، وهي متنوعة بدرجة مذهلة من حيث حجم الجسم وشكل الأجنحة وعادات الغذاء.

هذه الملاحظات تصير قابلةً للتفسير لو أن أسلاف هذه الأنواع المُستعمِرة للجزر وجدَتْ نفسها في بيئة خالية من أي منافِس متوطِّن، ومن شأن هذا الموقف أنه سمح




شكل ٤-٤: رسم توضيحي لمناقير الشرشوريات التي وصفها داروين، يُظهِر الاختلافاتِ في الحجم والشكل بين الأنواع المعتمِدة على نُظُمٍ غذائية مختلفة.

بتطوُّر سمات كيَّفَتِ الأنواعَ المُستعمِرة مع طرق الحياة الجديدة، وسمح بتنوُّع النوع السَّلَف إلى عدة أنواع منحدرة. وبالرغم من التعديلات غير المعتادة في البنية والسلوك التي نراها في الشرشوريات التي درسها داروين، فإن دراسات الدي إن إيه الخاص بها،




شكل ٤-٥: شجرة تطوُّر الشرشوريات التي وصفها داروين وأقربائها. الشجرة مبنية على الاختلافات الموجودة بين الأنواع المختلفة في تتابعات الدي إن إيه لجين موجود في الميتوكندريات الخاصة بها. طول الأفرع الأفقية في الشجرة يشير إلى مقادير الاختلافات بين الأنواع (تتراوح بين ٠٫٢٪ في حالة الأنواع الأقرب بعضها إلى بعض، و١٦٫٥٪ في حالة الأنواع الأبعد بعضها عن بعض). تبيِّن الشجرةُ أن أنواع جزر جالاباجوس تشكِّل عنقودًا من الواضح أنه منحدر من سلف واحد مشترك، وأن لديها جميعًا تتابعاتٍ متشابهةً لهذا الجين، وهو ما يتفق وكون هذا السلف حديثًا إلى حدٍّ كبير. وعلى النقيض، أنواعُ الشرشوريات الأخرى يتباين بعضُها عن بعض كثيرًا.

التي أُجرِيت بالطرق المذكورة في الفصلين الثالث والسادس، تُبيِّن أن هذه الأنواع لها أصل حديث نسبيًّا يعود إلى نحو ٢٫٣ مليون عام مضت، وهي مرتبطة على نحو وثيق بالأنواع الموجودة على البر الرئيسي (شكل ٤-٥).

وقد كتب داروين في مؤلَّفِه «أصل الأنواع» واصفًا الكائنات التي تقطن جزر جالاباجوس يقول:

> هنا، كلُّ نتاجٍ تقريبًا للأرض وللماء يحمل طابعًا جليًّا للقارة الأمريكية؛ فهناك ستة وعشرون نوعًا من الطيور الأرضية، خمسةٌ وعشرون منها صنَّفَها السيد جولد بوصفها أنواعًا منقرِضة، من المفترض أنها خُلِقَت هنا، ومع ذلك فالتشابُه اللصيق لأغلب هذه الطيور مع الأنواع الأمريكية في كل سمة، في عاداتها وحركاتها ونغمات صوتها، كان جليًّا. والحال كذلك بالنسبة إلى الحيوانات الأخرى، وكلِّ النباتات الأخرى تقريبًا، كما بيَّنَ د. هوكر في مذكراته الجديرة بالإعجاب عن الحياة النباتية في هذا الأرخبيل. إن عالِم الطبيعة، إذ ينظر للكائنات التي تقطن هذه الجزرَ البركانية في المحيط الهادي بعيدًا بمئات كثيرة من الأميال عن القارة؛ يشعر أنه يقف على أرض أمريكية. لِمَ ينبغي أن يكون الحال كذلك؟ لِمَ ينبغي لنوع من المفترض أنه خُلِق في أرخبيل جالاباجوس، وليس في أي مكان آخَر، أن يحمل بهذا الجلاء طابعًا للتشابه مع تلك الأنواع التي خُلِقت في أمريكا؟ لا يوجد شيء في ظروف الحياة، أو في الطبيعة الجيولوجية للجزر، أو في ارتفاعها أو مناخها، أو في النِّسَب التي ترتبط بها الأصنافُ المختلفة معًا، يشبه عن كثبٍ الظروفَ الموجودة في ساحل أمريكا الجنوبية، في الواقع، هناك قدْرٌ كبير من الاختلاف في كل هذه الجوانب.

ونظرية التطور، بالطبع، تقدِّم الجوابَ على هذه الأسئلة، وقد أكَّدَتِ الدراساتُ التي أُجرِيتْ على أشكال الحياة على الجزيرة عبر المائة والخمسين عامًا الماضية، الأفكارَ الثاقبة التي تَوصَّل إليها داروين.

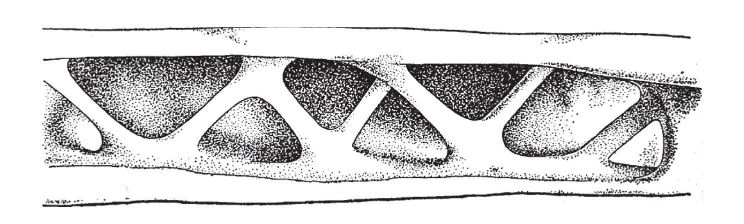
الفصل الخامس

# التكيُّف والانتخاب الطبيعي

## مشكلة التكيُّف

من المهام الأساسية لنظرية التطور تفسيرُ تنوُّعِ الكائنات الحية داخل التنظيم الهرمي لأوجه الشبه الموجودة بينها. في الفصل الثالث أكَّدنا على أوجه الشبه بين المجموعات المختلفة، وكيف أنها تَصير منطقيةً في ضوء نظرية داروين عن الانحدار مع التعديل. والجزءُ المهم الثاني للنظرية التطورية هو تقديمُ تفسيرٍ علمي لـ «تكيُّف» الكائنات الحية؛ تفسير مظهرها ذي التصميم الفني المُتقَن، وتنوُّعِها فيما يتصل بطرق معيشتها المختلفة. وسنتناول كلَّ هذا في هذا الفصل، الذي يعدُّ أطولَ فصول الكتاب.

هناك أمثلة بارزة لا تُحصى على التكيُّف، وسنذكر منها عددًا قليلًا فقط بهدف بيان طبيعة المشكلة. إن التنوع الذي تتسم به الأنواع المختلفة من الأعيُن وحدها أمرٌ مذهِل، ومع ذلك فهو منطقي تمامًا من حيث علاقته بالبيئات التي تعيش فيها الحيوانات المختلفة؛ فالأعينُ التي ترى تحت الماء تختلف عن تلك التي ترى في الهواء، وأعينُ المفترسات متكيِّفةٌ بشكل خاص كي تكشِفَ تخفِّي فرائسها، التي تطوَّرَتْ بدورها كي يصير من الصعب رؤيتها. والعديد من المفترسات تحت الماء، التي تأكل حيواناتٍ بحريةً شفَّافة، لها أعين بها منظومات تزيد التبايُنَ الضوئي، بما في ذلك الرؤية بالأشعة فوق البنفسجية والرؤية الضوئية الاستقطابية. من أوجه التكيُّف الأخرى المعروفة جيدًا العظامُ المجوفة في أجنحة الطيور، ذات الدعائم الداخلية التي تُشبِه تلك الموجودة في أجنحة الطائرات (الشكل ٥-١)، أو التركيب الرائع لمفاصل الحيوانات، التي يسمح سطحُها للأجزاء المتحركة بتحرُّكِ بعضها فوق بعض على نحوٍ سلس.



شكل ٥-١: عظمة مجوفة موجودة بجناحَيْ طائر مفترس، بها دعامات داخلية مقوية.

وهناك أمثلة أخرى عديدة تقدِّمها عمليات التكيف لدى الحيوانات، وهي المرتبطة بطرقها المختلفة في الاغتذاء، وتقدمها كذلك عمليات التكيف التبادلية لدى الكائنات التي تتغذى الأولى عليها؛ فللفراشات ألْسِنة طويلة تمكِّنها من الوصول إلى عمق كبير داخل الأزهار وامتصاص الرحيق، وعلى نحوٍ متبادل، تتسم الزهور بقابليةٍ عاليةٍ للرؤية من جانب الحشرات، وهي تُعلِن عن وجودها عن طريق الروائح، كما تكافئ زوَّارَها بالرحيق. للضفادع والحَرابِيِّ ألْسِنة طويلة لزِجة يمكِنُها الانطلاق واقتناص فرائسها من الحشرات. العديد من الحيوانات له أوجه تكيُّفٍ تُساعده على الهرب من المفترس، ويعتمد مظهر هذه الحيوانات على المكان الذي تعيش فيه؛ فاللون الفضي الذي تتسم به أنواع عديدة من الأسماك يجعل رؤيتَها في الماء أكثرَ صعوبةً، وعلى النقيض من ذلك، نجد أن قلة قليلة من حيوانات اليابسة لها مثل هذا اللون. وبعض الحيوانات لها ألوان مموَّهة، تُحاكي على نحوٍ استثنائي أوراقَ الشجر أو الأغصان، أو غيرَها من الأنواع السامة أو اللادغة.

يمكن التعرُّف بيُسْرٍ على أوجه التكيُّف في العديد من تفاصيل حياة الحيوانات والنباتات والميكروبات، على كل مستوًى، نزولًا إلى الآلة الخلوية وأدوات التحكُّم الموجودة بها (الموصوفة في الفصل الثالث)؛ على سبيل المثال: الانقسام الخلوي وحركات الخلية تحرِّكها محركاتٌ صغيرة مصنوعة من جزيئات بروتينية، وتحدث عمليةُ التصحيح اللغوي للدي إن إيه المُنتَج حديثًا حين تُنسَخ المادةُ الوراثية أثناء تكوين خلية جديدة، وهو ما يقلِّل وتيرةَ حدوث الطفرات الضارة بآلاف المرات. تسمح التجمعات البروتينية في أسطح الخلايا بدخول بعض المواد الكيميائية، لكنها تمنع موادَّ أخرى من الدخول؛ ففي الخلايا العصبية، تُستخدَم هذه التجمُّعات في التحكُّم في تدفُّق الذرات المعدنية المشحونة

كهربيًّا عبر سطح الخلية، مولِّدة الإشاراتِ الكهربيةَ المستخدَمة في نقل المعلومات على امتداد الأعصاب. إن الأنماط السلوكية للحيوانات هي الناتج النهائي لأنماط نشاطها العصبي، وهي بالقطع متكيِّفة مع طُرُق عيش هذه الحيوانات؛ ففي الطيور، على سبيل المثال، تزيل الطيورُ المتطفِّلة كالوقواق، بيضَ النوع المضيف أو صغاره من العش، تاركةً بيضَها ومِن ثَمَّ صغارها كي يربِّيها النوعُ المضيف؛ وردًّا على ذلك تكيَّفَتِ الأنواعُ المضيفة بأن صارَتْ أكثر تيقُّظًا. أما النمل الذي يُنشِئ «حدائقَ» من الفطريات، فقد طوَّرَ سلوكياتٍ من بينها إزالةُ أبواغ الفطريات التي تلوث أوراق النبات المتحلِّلة. وحتى المعدل الذي يهرم به الحيوان أو النبات يتكيَّف مع البيئة التي يعيش فيها، كما سنرى في الفصل السابع.

قبل أعمال داروين ووالاس، بدَتْ أوجهُ التكيُّف هذه وكأنها تحتاج إلى وجود صانع؛ إذ لم يَبدُ هناك أيُّ سبيلٍ آخَر لتفسير التفصيل المذهل والإتقان الواضح للعديد من ملامح الكائنات الحية، تمامًا مثلما يستحيل أن يكون تعقيدُ الساعة ناتجًا عن عملية إنتاجٍ طبيعيةٍ خالصة. كان غياب أي تفسير آخَر هو مصدر الدعم الرئيسي لـ «حجة التصميم»، التي طوَّرها لاهوتيُّو القرنِ الثامن عشر بهدف «إثبات» وجود خالق، وتَمَّ استحداث مصطلح «التكيُّف» كي يصف الملاحظةَ التي تقضي بأن الكائنات الحية لها بنًى يبدو أنها مفيدة لها، ومن المهم أن نتفهَّم أن وصْفَ هذه البنى بأنها أوجهُ تكيُّفٍ إنما يطرح سؤالًا. وإن رؤيتَنا لأوجه التكيُّف هذه على أنها أمور تحتاج إلى تفسيرٍ، قد مثَّلَتْ مساهمةً قيِّمةً في فهمنا للحياة.

ما من شك في أن الحيوانات والنباتات تختلف عن الأشياء المُنتَجة بفعل الطبيعة، كالصخور والمعادن، وهو ما نقرُّ به في اللعبة التي بعنوان «حيوان أم نبات أم معدن؟» إلا أن حجة التصميم تغفل إمكانيةَ أن تكون هناك عملياتٌ طبيعية — إلى جانب تلك التي تنتج المعادن والصخور والجبال والأنهار — يمكنها تفسير الكائنات الحية بوصفها منتجاتٍ طبيعيةً معقَّدة، دون الحاجة لوجود مصمِّم. إن التفسير البيولوجي لمنشأ أوجه التكيُّف يحلُّ محلَّ فكرة المصمِّم، وهو أمر محوري في علم الأحياء التطوري التالي على زمن داروين. وفي هذا الفصل، سنصف نظريةَ التكيُّفِ الحديثة إلى جانب مسبباتها وأساسها البيولوجي، وهذا مبنيٌّ على نظرية الانتخاب الطبيعي، التي أوضحناها في الفصل الثاني.

## الانتخاب الاصطناعي والتنوُّع القابل للتوارث

ثمة ملاحظة أولى وثيقةُ الصلةِ بالموضوع، أكَّدَ عليها داروين بقوة، مفادها أن تعديل الكائنات بواسطة البشر هو أمرٌ ممكنُ الحدوثِ على نحو منتظم، ويمكنه أن ينتج مظهرَ التصميم نفسه الذي نراه في الطبيعة. يتحقَّق هذا على نحوٍ روتيني من خلال «الانتخاب الاصطناعي»؛ أي الاستيلاد الانتقائي للحيوانات والنباتات ذات السمات المرغوبة. يمكن إنتاج تغييرات لافتة للغاية عبر إطار زمني قصير مقارَنةً بنطاق السجل الحفري للتطور؛ على سبيل المثال: لقد طوَّرْنا سلالاتٍ عديدةً مختلفة من الكرنب، منها أنواع غريبة مثل القنبيط والبروكلي، التي تُعَدُّ طفراتٍ تتسبَّبُ في تكوين أزهار عملاقة لرءوس ضخمة، وأنواع أخرى مثل كرنب بروكسل الذي تنمو فيه الأوراقُ بشكل غير طبيعي (الشكل ٥-٢أ). وعلى نحو مشابه، استولَدَ البشرُ سلالاتٍ عِدَّة من الكلاب (الشكل ٥-٢ب)، بها اختلافات تشبه كثيرًا تلك المرصودةَ بين الأنواع المختلفة في الطبيعة، على النحو الذي أوضحه داروين؛ ومع ذلك، بالرغم من أن كلَّ أفراد فصيلة الكلبيات (التي منها ذئب القيوط وابن آوى) أقرباءُ متقاربة ويمكنها التزاوج فيما بينها، فإن سلالات الكلاب المستولَدة ليست تدجينًا لأنواع مختلفة من الكلاب البرية، وإنما أُنتِجت عبر ألوف الأعوام القليلة الماضية (عدة مئات من أجيال الكلاب) بواسطة الانتخاب الاصطناعي من نوع واحد هو السلف المشترك لها جميعًا؛ الذئب. إن تتابعات الدي إن إيه الخاصة بجينات الكلاب هي في جوهرها مجموعةٌ فرعية من تتابعات الذئب، أمَّا ذئبُ القيوط (الذي يُعتقَد من واقع الحفريات أن سلفه قد انفصَلَ عن أسلاف الذئاب منذ مليون عام)، فيبلغ مقدارُ اختلافه عن الكلاب أو الذئاب نحوَ ثلاثة أضعاف أقصى مقدار للاختلاف بين الكلاب والذئاب؛ ومن الممكن استخدام الاختلافات بين الكلاب من حيث تتابعات الجين نفسه — تلك الاختلافات التي يُفترَض أنها تطوَّرت بعدَ انفصال الكلاب عن الذئاب — في معرفة مقدار الزمن المنقضي على حدوث هذا الانفصال (انظر الفصل الثالث). والاستنتاج الختامي هو أن الكلاب انفصلَتْ عن الذئاب منذ فترة تزيد كثيرًا عن ١٤ ألف عام مضت، وهو التاريخ الذي تقترحه السجلات الأثرية، ولكنها لا تزيد عن ١٣٥ ألف عام مضت.

إن نجاح الانتخاب الاصطناعي ممكن بسبب التنوع القابل للتوارث الموجود داخل التجمعات والأنواع (أيْ تلك الفروقات البسيطة بين الأفراد العاديين، التي وصفناها في الفصل الثالث). وحتى دون أي فهم لعملية الوراثة، تمكَّنَ الناسُ من استيلاد الحيوانات




(أ)



(ب)

شكل ٥-٢: (أ) بعض الأشكال المتنوعة المستنبَتة من الكرنب. (ب) الاختلافات في الحجم والشكل بين سلالتين من الكلاب.

والنباتات التي لها سماتٌ يحبونها أو سماتٌ وجدوها مفيدةً، وعبر ما يكفي من الأجيال ولَّدت هذه العمليةُ سلالاتٍ من الحيوانات والنباتات يختلف بعضها عن بعض اختلافًا عظيمًا، وتختلف عن أسلافها التي خضعت للتدجين في البداية؛ يُظهِر هذا بوضوح أن الأفراد داخل أيِّ نوع مدجَّن لا بد أنهم كانوا مختلفين بعضهم عن بعض، وأن العديد من الاختلافات يمكن أن تُمرَّر من الآباء لأبنائهم، بمعنى أنها قابلة للتوارث. وإذا كانت الاختلافات راجعةً فقط إلى الطريقة التي تُعامَل بها الحيواناتُ أو النباتات، لم يكن الاستيلاد الانتقائي والانتخاب الاصطناعي ليؤثِّرَا على الجيل التالي. فإن لم تكن بعض الاختلافات قابلةً للتوارث، يكون السبيل الوحيد لتحسين السلالة هو الإدارة الجيدة فحسب.

كل سمة يمكن تخيُّلها يمكن أن تتنوَّعَ من ناحيةِ قابليةِ التوارث؛ فكما هو معروف، تتباين سلالاتُ الكلاب المختلفة، ليس فقط من حيث المظهر والحجم، وإنما كذلك من حيث السمات العقلية مثل الشخصية والنزعات؛ إذ يميل بعضها لأنْ يكون وَدُودًا، بينما يتَّسِم البعضُ الآخَر بالشراسة ويصلح للاستخدام في الحراسة. وتتباين الكلاب من حيث اهتمامها بالروائح، وميلها للسباحة أو لممارسة لعبة الْتِقاطِ العصا، وكذلك من حيث الذكاء. وهي تتباين من حيث الأمراض التي هي معرَّضة للإصابة بها، كما في حالة الكلاب الدلماسية المعرَّضة للإصابة بمرض النقرس، بل إنها تتباين أيضًا من حيث المعدلات العمرية، فنجد بعض السلالات، كالشيواوا، له أعمار طويلة بدرجة مدهشة (إذ تقارِبُ في مداها العمري القططَ)، بينما تعيش أخرى، كالكلب الدنماركي العظيم، لنصف هذه المدة فقط. وبالرغم من أن كل هذه السمات تتأثَّر، بطبيعة الحال، بالظروف البيئية مثل الرعاية الجيدة والعلاج، فإنها تتأثَّر بقوةٍ بعامل الوراثة.

ثمة اختلافاتٌ مشابهة قابِلةٌ للتوارث معروفةٌ في العديد من الأنواع المدجنة الأخرى؛ فعلى سبيل المثال: سماتُ الأنواع المختلفة من التفاح هي اختلافاتٌ قابلة للتوارُث، وهي تتضمَّن أوجهَ التكيُّف مع الاحتياجات البشرية المختلفة مثل الحصاد المبكر أو المتأخر، وملاءمة الطبخ أو الأكل، وملاءمة المناخات المختلفة للبلدان المختلفة. وتمامًا مثلما في حالة الكلاب، حدثَتْ عملياتٌ تطورية في التفاح في الوقت نفسه الذي جَرَتْ فيه عمليةُ الانتخاب البشرية، ولا يمكن الوصول مطلقًا للحالة المثالية من حيث كل السمات المرغوبة؛ على سبيل المثال: النوع «كوكس» من التفاح له نكهة قوية للغاية، لكنه معرَّض للإصابة بالآفات بدرجة كبيرة.

## أنواع التنوُّع القابل للتوارُث

إن نجاح الانتخاب الاصطناعي لَدليل قوي جدًّا على أن أنواعًا عديدة من اختلافات السمات في الحيوان والنبات قابلة للتوارث. هناك أيضًا دراسات وراثية عديدة تُبيِّن وجودَ تنوُّع قابل للتوارث في سمات نطاق عريض من الكائنات في الطبيعة، منها أنواع كثيرة من الحيوانات والنباتات والفطريات والبكتيريا والفيروسات. ينشأ التنوُّعُ بفعل عمليات مفهومة بدرجة جيدة من التطافُر العشوائي في تتابعات الدي إن إيه الخاصة بالجينات، على نحوٍ مشابه لتلك التي تُنتِج خللًا وراثيًّا لدى البشر (الفصل الثالث). أغلب الطفرات تكون ضارَّةً بالصحة على الأغلب، مثل الأمراض الوراثية التي تُصيب البشرَ وحيوانات المزارع، لكنْ في بعض الأحيان تحدث طفراتٌ مفيدة؛ هذه الطفرات أدَّت إلى مقاومة الحيوانات للمرض (مثل تطوُّر مقاومة للأورام المخاطية لدى الأرانب). وهي أيضًا مسئولة عن مشكلة كبيرة اليومَ؛ إذ تطوِّر الآفاتُ مقاوَمةً للمواد الكيميائية المستخدَمة لمكافحتها (منها مقاومة الفئرانِ الوارفارين، ومقاومة الديدان الطفيلية في البشر وحيوانات المزارعِ العقاقيرَ التي تساعد على التخلُّص من الديدان الموجودة في الأمعاء، ومقاومة البعوضِ المبيداتِ، ومقاومة البكتيريا المضاداتِ الحيويةَ). وبسبب أهميتها لصحة الإنسان أو الحيوان، صارت حالاتٌ عديدة مفهومةً بتفصيل كبير.

الاختلافات القابلة للتوارث معروفة أيضًا لدى الإنسان؛ فقد يأخذ التنوُّع شكلَ اختلافات في سمات «منفصلة»، مثل لون العين ولون الشعر، كما ذكرنا من قبلُ. هذه صور متنوِّعة تتحكَّم فيها الاختلافاتُ في جينات فردية، ولا تتأثَّر بالظروف البيئية (أو تتغيَّر بفعلها بشكلٍ طفيف، مثلما تتسبَّب الشمس في جعل لون شعر الشخص الأشقر باهتًا بدرجةٍ أكبر)؛ يُطلَق على التنويعات المشتركة كهذه اسم «تعدُّد الأشكال». تَنتج حالاتٌ مثل عمى الألوان بفعل اختلافات وراثية بسيطة، لكنها تكون أكثرَ ندرةً في التجمعات البشرية. بل حتى السمات السلوكية يمكن أن تكون قابلةً للتوارث؛ فأمرٌ مثل ما إذا كانت مستعمَرةُ النمل الناري لها مَلِكة واحدة أو عِدَّة مَلِكات، إنما يتحكم به اختلافٌ في جينٍ منفردٍ يشفِّر بروتينًا يرتبط بمادة كيميائية تساهم في عملية التعرُّف على الأفراد الآخرين.

التنوع «المتواصل» هو أيضًا واضحٌ وضوح الشمس في العديد من سمات التجمعات، مثل تدريجات الطول والوزن بين البشر؛ هذا النوع من التنوع يتأثَّر بشكل ملحوظ عادةً بالظروف البيئية؛ فالطول المتزايد لأجيال متعاقبة خلال القرن العشرين، ذلك الذي نراه

في العديد من الدول المختلفة، ليس راجعًا إلى تغيُّرات وراثية، وإنما إلى ظروف الحياة المتغيِّرة، منها التغذية الأفضل وقلة عدد الأمراض الخطيرة خلال فترة الطفولة. ومع هذا، هناك أيضًا درجة ما من الحتمية الوراثية فيما يخص هذه السمات في التجمعات البشرية، وهذا أمر معروف من دراسات التوائم المتطابقة وغير المتطابقة. إن التوائم غير المتطابقة هم أشقاء عاديون تصادَفَ أنه تمَّ الحمل بهم في الوقت عينه، ويوجد بين فردَيِ التوءم غير المتطابِق من الاختلافات ما يوجد بين أيِّ شقيقين عاديين، أمَّا التوءم المتطابِق فيأتي من بويضة مخصَّبة واحدة انقسمَتْ إلى جنينين متماثِلَيْن من الناحية الوراثية. وقد ثبت وجودُ أوجه تشابه أكبر بين التوائم المتطابِقة مقارَنةً بالتوائم غير المتطابِقة فيما يخصُّ العديدَ من السمات، وهو الأمر الراجع بشكل مؤكَّد إلى التشابُه الوراثي بينهم (بطبيعة الحال يجب الحرص على عدم معاملة التوائم المتطابِقة على أنهم أكثر تشابهًا من التوائم غير المتطابقة؛ على سبيل المثال: يجب فقط دراسةُ التوائم من الجنس نفسه، سواء في التوائم المتطابقة أم غير المتطابقة). بالرغم من التأثيرات البيئية المهمة الموجودة بوضوح، فإن هذا الدليل وغيره من الأدلة يكشف عن درجةٍ ما من الأساس القابل للتوارث للتنوُّع في العديد من السمات، منها جوانب الذكاء. وقد وُثِّقَ التنوع القابل للتوارُث في العديد من الكائنات، وذلك فيما يخصُّ كلَّ أنواع السمات. وحتى موضع الحيوان داخل الترتيب الهرمي للهيمنة، أو ترتيبه الهرمي، يمكن أن يكون قابلًا للتوارث، وقد تمَّ بيان ذلك في كلٍّ من الدجاج والصراصير. إن مقدار التنوُّع الوراثي المتواصل يمكن قياسُه من واقع التشابهات بين الأقارب ذوي الدرجات المختلفة، وهذا أمر مفيد عند استيلاد الحيوانات وتهجين المحاصيل النباتية، ويمكِّن المهجِّنين من التنبُّؤ بالسمات — مثل لبن الأبقار — التي سيمتلكها أبناءُ كل والدَيْن؛ ومِن ثَمَّ يصير بمقدورهم التخطيطُ لعملية الاستيلاد.

في النهاية، ما الاختلافات الوراثية في حقيقتها إلا اختلافات في «حروف» الدي إن إيه، وهذه الاختلافات تترك في المعتاد تتابعاتِ الأحماض الأمينية الخاصة بالبروتينات دون تغيير. وعند مقارَنةِ تتابعات الدي إن إيه الخاصة بالجين نفسه لدى أفرادٍ مختلفين، تُرَى الاختلافات، وإن كانت الاختلافاتُ وقتَها تكون أقلَّ عددًا ممَّا يكون عليه الحال عند المقارَنة بين جينات نوعين مختلفين تمامًا (ناقشنا مثلَ هذه المقارنات في الفصل الثالث، انظر الشكل ٣-٨). على سبيل المثال: يُمكن مقارَنةُ نُسَخ الجين الخاص بنازعة هيدروجين الجلوكوز ٦ فوسفات، المذكور في الفصل الثالث، وذلك لدى كل فرد من أفراد مجموعةٍ ما. قد لا تكون هناك اختلافاتٌ (ومِن ثَمَّ لا يوجد تنوُّع). وإذا كان بعض

أفراد المجموعة يملكون تتابعًا متغيِّرًا من الجين، فسيظهر الاختلاف في بعض المقارنات؛ ويُطلَق على هذا اسمُ تعدُّدِ الأشكال الجزيئي. يقيس علماءُ الوراثة هذا التنوُّعَ من خلال نسبة حروف تتابُعات الدي إن إيه التي تتباين بين الأفراد في التجمع؛ لدى البشر، نجد عادةً أن أقل من ٠,١ بالمائة من حروف الدي إن إيه تتباين حين نقارن تتابُعَ الجين نفسه لدى أشخاص مختلفين (مقارَنة بنسبةٍ قدرُها نحو ١ بالمائة من الاختلاف في الحروف حين نقارِن تتابُعاتِ الجينات بين البشر والشمبانزي). يكون التنوُّعُ أعلى في بعض الجينات وأقلَّ في بعضها الآخَر، وكما هو متوقَّع فإن التنوع يكون أعلى عادةً في المناطق التي يُفترَض أنها أقل أهميةً داخل الجينوم، والتي لا تشفِّر بروتينات، وذلك مقارَنةً بالمناطق المشفِّرة من الجينات. ويتسم البشر بقلة التنوُّع مقارَنةً بالأنواع الأخرى، فنجد أن الذرة مثلًا يشيع فيها تعدُّدُ أشكال الدي إن إيه بصورة أكبر بكثير من البشر (أكثر من ٢ بالمائة من حروف الدي إن إيه متباينة).

يمكن أن يمنحنا توزيع التنوع داخل النوع معلومات مفيدة؛ فحين يتم استيلاد الكلاب بغرض الحصول على سمات معينة، تتسم السلالة الناتجة بالاتساق من حيث السمات؛ يرجع هذا إلى قواعد الاستيلاد الصارمة، التي تتحكم في التزاوج وتمنع «تدفُّقَ الجينات» بين السلالات؛ ومن ثَمَّ فإن سمة معينة مرغوبة في إحدى السلالات، مثل جلب الأغراض، تتطوَّر تطورًا قويًّا في هذه السلالة فقط، وتميل السلالاتُ المختلفة إلى التباعُد بعضها عن بعض. هذا الانعزال بين السلالات أمر غير طبيعي، وبمقدور الكلاب من سلالات مختلفة أن تتزاوَجَ وتنجب صغارًا أصحاء؛ ومن ثَمَّ يكون معظم التنوُّع بين الكلاب موجودًا بين السلالات المختلفة. إن أنواعًا طبيعية عديدة تعيش في تجمُّعات منفصلة جغرافيًّا، وكما هو متوقَّع فإن مقدار التنوُّع في مثل هذه الأنواع إجمالًا يكون أكبر ممَّا هو عليه داخل أي تجمع منفرد؛ لأنه يوجد اختلافات بين التجمعات؛ على سبيل المثال: بعض فصائل الدم تكون أكثرَ شيوعًا داخلَ أعراقٍ بشريةٍ معينة دون غيرها (انظر الفصل السادس)، والأمر عينه ينطبق على العديد من العوامل الوراثية المتنوعة الأخرى. ومع ذلك، في البشر وفي أنواع أخرى عديدة في الطبيعة، تكون الاختلافات بين التجمعات طفيفةً للغاية مقارَنةً بالتنوُّع داخل التجمُّعات، وذلك على عكس الموقف في حالة سلالات الكلاب، والفارق هنا سببه أن البشر يتنقَّلون بحريةٍ بين التجمُّعات. ومن التبعات المهمة لهذه النتائج الوراثية أن الأعراق البشرية تتمايز عن طريق نسبة بسيطة من الجينات في جينوماتنا، وأغلب التركيب الجيني على مستوى العالم يتَّسِم بنطاق متشابِه ومحدود من

حيث التبايُن؛ وتعمل القدرةُ المتزايدة على الانتقال في عالمنا الحديث على التقليل السريع لأي اختلافات بين التجمعات.

## الانتخاب الطبيعي والصلاحية

من الأفكار الجوهرية التي تقوم عليها نظريةُ التطوُّر بفعل الانتخاب الطبيعي، فكرةُ أن بعض الاختلافات في السمات القابلة للتوارُث تؤثِّر على البقاء والتكاثُر؛ على سبيل المثال: تمامًا مثلما تمَّ انتخابُ أحصنةِ السباق اصطناعيًّا لتعظيم سمة السرعة (عن طريق الاستيلاد من الأحصنة الفائزة وأقربائها)، تمَّ انتخابُ الظباء طبيعيًّا لتعظيم سمة السرعة؛ لأن الأفراد التي تتناسل وتسهم في مستقبل النوع، هي تلك التي لم تُؤكَل من جانب الحيوانات المفترسة، وقد أدركَ داروين ووالاس أن هذا النوع من العمليات يمكنه أن يفسِّر التكيُّفَ مع الظروف الطبيعية. إن قدرتنا على تعديل الحيوانات والنباتات عن طريق الانتخاب الاصطناعي، إنما تعتمد على كون هذه السمة لها أساس قابل للتوارث؛ فما دامَتْ هناك اختلافات قابلة للتوارث، فسيقوم الأفراد الناجحون في البرية بتمرير جيناتهم (ومن ثَمَّ سماتهم الجيدة) إلى أبنائهم، الذين سيمتلكون بالتبعية السماتِ التكيفيةَ، مثل السرعة.

تحرِّيًا للإيجاز، ومن أجْل تمكيننا من التفكير بصورة كلية، عادةً ما تُستخدَم كلمةُ «الصلاحية» في الكتابات الخاصة بعلم الأحياء لتمثيل القدرة العامة على البقاء والتكاثر، دون الحاجة إلى تحديدِ أي سمات بعينها ذات صلة (تمامًا مثلما نستخدم مصطلحَ «الذكاء» لنعني مجموعةً من القدرات المختلفة). يسهم العديد من الجوانب المختلفة للكائن في الصلاحية، فالسرعة — مثلًا — مجرد ملمح واحد يؤثِّر على صلاحية الظبي؛ فاليقظة والقدرة على رصد المفترسات سمتان مهمتان هما الأخريان. ومع ذلك فالبقاء وحده ليس كافيًا، والقدرات التكاثرية، كإطعام الصغار ورعايتهم، مهمة هي الأخرى لصلاحية الحيوانات، وكذلك القدرة على جذب الحشرات الناقلة لحبوب اللقاح لها أهمية حيوية في صلاحية النباتات المزهرة؛ وبذلك يمكن أن تُستخدَم كلمةُ الصلاحية لوصف فعل الانتخاب على نطاق عريض من السمات المختلفة. وكما هو الحال بالنسبة إلى سمة «الذكاء»، فإن عمومية مصطلح «الصلاحية» أدَّت إلى نشوب عدد من حالات سوء الفهم والخلاف.

من أجْل معرفة الصفات التي من المرجَّح أن تكون مهمةً في صلاحية الكائن، علينا أن نفهم الكثير عن طبيعته البيولوجية والبيئة التي يعيش فيها. والصفة نفسها يمكن أن تمنح صلاحيةً مرتفعةً في نوع ما، لكن ليس في نوع آخَر؛ فعلى سبيل المثال: ليست السرعةُ صفةً مهمة في صلاحية السحلية التي تهرب من مفترسيها عن طريق التمويه، وإذا كانت تلك السحلية تعيش في الأشجار وهي جاثمة على الأغصان، فمن الأفضل لها أن تكون قادرةً على الإمساك بالأغصان جيدًا عن أن تجري بسرعة؛ ومِن ثَمَّ تكون الأرجلُ القصيرة، لا الطويلة، هي المرتبطة بالصلاحية المرتفعة. السرعة صفة مهمة للظباء، لكن القدرة على البقاء في سكون شديد، حتى لا يتمُّ رصْدُها من قِبَل المفترسات، تُعَدُّ وسيلة بديلة تستخدمها حيوانات عديدة كي تتجنَّب الافتراسَ. وهناك حيوانات أخرى تتجنَّب المفترسات عن طريق إخافتها، فمثلًا بعض الفراشات تملك بقعًا على شكل أعين على أجنحتها يمكنها أن تُظهرها فجأةً من أجْل إخافة الطيور. من الجلِيِّ أن النباتات عاجزة عن الحركة، وهي تتجنَّب أن تُؤكَل بطُرُق مختلفة، منها أن يكون طعمها سيِّئًا أو أن تمتلك أشواكًا. كل هذه السمات المختلفة قد تزيد قدرةَ الكائنات على البقاء و(أو) التكاثر، ومِن ثَمَّ صلاحيتها.

في ضوء التنوع الوراثي فيما يخص العديد من السمات، والاختلافات البيئية، سيقوم الانتخاب الطبيعي لا محالة بعمله، وسيتغير التركيبُ الوراثي للتجمعات والأنواع مع مرور الوقت، كما أوضحنا في الفصل الثاني. في المعتاد تكون التغيرات بطيئةً من المنظور الزمني؛ لأن أي تغيُّر وراثي نادر يحتاج إلى عِدَّة أجيال كي يصير النمطَ الغالب في التجمع. عند استيلاد الحيوانات أو النباتات، تحدث عمليةُ انتخابٍ قاسيةٌ (على سبيل المثال: حين يقتل أحدُ الأمراض أغلبَ أفراد قطيعٍ ما أو محصولٍ من النبات)، ومع هذا لا تزال التغيرات تحتاج إلى سنوات كي تَقَع. يُقدَّر أن نبات الذُّرة خضع للزراعة على يد البشر منذ عشرة آلاف عام، ومع هذا فأقماع الذرة الكبيرة الحديثة تُعَدُّ تطورًا حديثًا إلى حدٍّ كبير. وبالرغم من بطء عملية التغير التطوري من المنظور الزمني، فإن الانتخاب الطبيعي يمكنه أن يُنتِج تغيرات سريعة على النطاق الزمني للسجل الحفري؛ فالسمات المفيدة يمكنها أن تنتشر بين أفراد أحد التجمعات انطلاقًا من معدل تواتر ابتدائي منخفض، وذلك في وقت أقل من ذلك الذي يفصل الطبقات الجيولوجية الصخرية المتتابعة (والذي يبلغ في المعتاد على الأقل عدة آلاف من السنوات، انظر الفصل الرابع).

وبالرغم من أننا نعجز عادة عن رؤية الانتخاب الطبيعي وهو يحدث، بسبب بطئه وفق المقياس الزمني لأعمارنا، فإنه في حقيقة الأمر عملية لا تتوقف. وحتى البشر لا يزالون يتطورون؛ على سبيل المثال: يختلف نظامنا الغذائي عن ذلك الخاص بأسلافنا، وتستطيع أسناننا التعامل بشكل طيب للغاية مع الأطعمة الحديثة الرخوة، حتى إنْ لم تكن قويةً بدرجة كبيرة. يؤدِّي المحتوى العالي من السكر في الأطعمة الحديثة إلى تسوُّس الأسنان، وقد يؤدِّي إلى خراريج قد تكون قاتلة، لكن لم يَعُدْ هناك انتخاب طبيعي ظاهر فيما يخص الأسنان القوية؛ لأن الرعاية الطبية للأسنان يمكنها أن تحلَّ هذه المشكلات، أو توفِّر أسنانًا صناعية. وتمامًا مثلما هو حال الوظائف الأخرى التي لم تَعُد مستخدَمة بشكل مكثَّف، فمن المتوقَّع حدوث تغيرات في الأسنان، وقد تصير يومًا ما أعضاءً لا وظيفية. إن أسناننا بالفعل أصغر من تلك الخاصة بأقرب أقرباء البشر؛ الشمبانزي، ولا يوجد سبب يمنعها من أن تصير أصغر وأصغر. أيضًا أدَّى محتوى السكر الزائد في نظامنا الغذائي إلى زيادة معدلات الإصابة المتأخِّرة بداء السكري في التجمعات البشرية، مع ارتفاع نسبة الوفيات بين المصابين به. في الماضي، كان هذا المرض مقصورًا بالأساس على الأشخاص الذين تجاوزوا سنَّ الإنجاب، لكنَّ وقتَ الإصابة بهذا المرض صار آخِذًا في التبكير؛ ومِن ثَمَّ يوجد ضغط انتخابي جديد، شديد على الأرجح، من أجْل تغيير تمثيلنا الغذائي كي يتوافَقَ مع نظامنا الغذائي المتغيِّر. وفي الفصل السابع سوف نبيِّن كيف تؤدِّي التغيراتُ في حياة البشر إلى إطالة أعمارهم.

عادةً ما يُساء فَهْم مفهوم الصلاحية؛ فحين يحاول البيولوجيون توضيحَ معنى هذا المصطلح، فإنهم يستخدمون عادةً أمثلةً تتوافق مع الاستخدامات اليومية لكلمة «الصلاحية»، مثل سرعة الظباء؛ سيكون هناك مقدار أقل من خطر التشوش والارتباك لو فكَّرنا في سماتٍ مثل العظام الخفيفة الوزن الخاصة بالطيور، التي لها مراكز مجوفة ودعامات داخلية مقوية (الشكل ٥-١). إن نظرية الانتخاب الطبيعي تفسِّر مثل هذه البنَى التي تبدو ظاهريًّا مُصمَّمة جيدًا عن طريق إيضاح أنه في الوقت الذي كان الطيران يتطور فيه، كان لدى الأفراد ذوي العظام الخفيفة الوزن فُرَصٌ أعلى بدرجة طفيفة في البقاء مقارَنةً بسواهم؛ وإذا ورث أبناؤهم عظامَهم الأخف، فسيزيد تمثيل السمة في التجمُّع على مر الأجيال. الأمر أشبه تمامًا بالانتخاب الاصطناعي الذي يضطلع به القائمون على استيلاد أسرع الكلاب، وهو ما تسبَّب في منْح الكلاب السلوقية سيقانًا خلفية طويلة ونحيفة، وهذه السيقان أكثرُ كفاءةً من الناحية الميكانيكية من السيقان

القصيرة، وتشبه سيقانُ الكلاب السلوقية سيقانَ الظباء وغيرها من الحيوانات السريعة العدْو، التي تطوَّرت عن طريق الانتخاب الطبيعي. إن بمقدورنا أن نَصِفَ الانتخابَ الطبيعي والاصطناعي على نحوٍ وافٍ تمامًا دون استخدام كلمة الصلاحية؛ فالانتخاب الطبيعي لا يعني في حقيقته أكثرَ من أن عواملَ متغيِّرةً معينةً يمكن تمريرها بصورة تفضيلية إلى الأجيال المستقبلية، والأفراد الذين يحملون الجيناتِ التي تقلِّل من نجاحهم في البقاء أو التكاثر، لن يمرروا في الغالب تلك الجينات بنفس المقدار الذي يقوم به الأفرادُ الآخَرون الذين تمنح جيناتُهم قدرةً أعلى على البقاء والتكاثر. إن مصطلح الصلاحية ما هو إلا اختصار مفيد يساعد في التعبير بإيجاز عن فكرة أن السمات تؤثِّر أحيانًا على فرص الكائن في البقاء و(أو) التكاثر، دون الاضطرار إلى تحديد سمة بعينها، وهو أيضًا مفيد في عمل نماذج رياضية للطريقة التي يؤثِّر بها الانتخابُ الطبيعي على التركيب الجيني للتجمع، وتمثِّل نتائجُ هذه النماذج أساسًا متينًا للعديد من العبارات التي نوردها في هذا الفصل، لكننا لن نصفها ها هنا.

لتوضيح عملية انتخاب طفرة مفيدة، تدبَّرْ سباقَ التسلُّحِ القائم بين البشر والفئران، الذي نحاول فيه تطويرَ سُمومٍ للفئران، وتحاول فيه الفئرانُ تطويرَ مقاوَمتها للسموم. إن سمَّ الفئران المسمَّى وارفارين يقتل الفئرانَ عن طريق منْعِ تخثُّر الدم؛ فهو يرتبط بإنزيم مطلوب في التمثيل الغذائي لفيتامين ك، الذي له دور مهم في تخثُّر الدم والعديد من الوظائف الأخرى. فيما مضى كانت الفئران المقاوِمة للسمِّ نادرةَ الوجود؛ لأن التمثيل الغذائي لفيتامين ك لديها تغيَّرَ، مقلِّلًا من نموها وبقائها؛ بعبارة أخرى: هناك «تكلفة» للمقاومة. لكن في المزارع والبلدات التي يُستخدَم فيها الوارفارين، وحدها الفئران المقاوِمة للسمِّ يمكنها البقاء؛ ومن ثَمَّ يوجد انتخاب طبيعي قوي، بالرغم من تكلفته المرتفعة؛ وبالتبعية انتشرَتِ النسخةُ المقاوِمةُ للسمِّ من الجين بمعدلات عالية في تجمع الفئران، وإن كانت التكلفةُ تمنعها من الانتشار بين كل أفراد النوع. ومع ذلك وقع أمر حديث تمثَّلَ في تطوير نوع جديد من المقاوَمة بَدَا أنها خالية من التكلفة، بل قد تكون مفيدة أيضًا (في غياب السم). هناك إذن تطوُّرٌ متواصِل استجابةً للتغيُّر في بيئة الفئران.

التنوع والانتخاب سمتان قويتان للغاية للعديد من الأنظمة، وليس فقط للكائنات المنفردة. ثمة مكونات معينة للمادة الوراثية يتم الحفاظ عليها، لا لأنها تزيد صلاحيةَ الكائنات التي تحملها، وإنما لأنها تستطيع التضاعُفَ داخل المادة الوراثية نفسها، وكأنها كائن طفيلي موجود في جسد عائله؛ إن نسبة ٥٠ بالمائة من الدي إن إيه البشري

يُعتقَد أنها تنتمي إلى هذه الفئة. كما أن هناك موقفًا آخَر يحفِّز فيه الانتخابُ الطبيعي عمليةَ التغيُّر التطوري داخل الكائن، وذلك في حالة الإصابة بالسرطان. السرطان مرض تطوَّر فيه خليةٌ ما ونسلُها سلوكًا أنانيًّا وتتضاعف، بغضِّ النظر عمَّا يُفيد بقية الجسد، ويحدث هذا المرض عادةً بفعل طفرة تزيد معدلاتِ التطافرِ الخاصةَ بجيناتٍ أخرى (على سبيل المثال: عن طريق فشلٍ في منظومة التصحيح الموصوفة في الفصل الثالث، التي تتحقَّق من تتابعات الدي إن إيه وتمنع حدوثَ طفرات). وإذا حدثت الطفرات بمعدلات مرتفعة، فقد يؤثِّر بعضها على معدلات تضاعُف الخلايا، وقد تَظهَر سلالةٌ سريعةُ التضاعف. ومع مرور الوقت، المزيد والمزيد من الخلايا سينحدر من الخلايا التي تحمل الطفرات في جيناتها، وهو ما يحثُّ على حدوث المزيد والمزيد من النمو، ومِن ثَمَّ يصير السرطان أكثر شراسةً. الخلايا السرطانية يمكن أيضًا أن تصير مقاوِمةً للعقاقير المستخدَمة في كبح نموِّها. ومثل الحالة المعروفة التي تتطوَّر فيها فيروسات إتش آي في المقاوِمة للعقاقير داخل مرضى الإيدز، فإن الخلايا السرطانية التي تكتسب طفراتٍ تمكِّنها من الإفلات من العقاقير الكابحة للنموِّ، تنمو بمعدلٍ يفوق النوعَ الأصلي للخلايا، وتسبِّب إنهاءَ حالةِ خمود السرطان؛ ولهذا السببِ، من غير المجدي عادةً استئنافُ العلاج بالعقاقير بعد توقُّفِ فترة الخمود.

على النقيض من ذلك، قد تكون هناك معدلات متباينة لانقراض الأنواع ذات مجموعات الخصائص المختلفة، بمعنى أنه يمكن أن يحدث انتخابٌ على مستوى النوع؛ على سبيل المثال: الأنواع ذات أحجام الأجساد الكبيرة، التي تميل إلى أن تملك أحجامَ تجمعاتٍ كبيرةً ومعدلاتِ تكاثُرٍ منخفضةً، تكون أكثر عرضةً للانقراض من الأنواع ذات الأجساد الأصغر (انظر الفصل الرابع). وعلى النقيض من ذلك، الانتخاب بين الأفراد داخل النوع نفسه يُحابي عادةً حجمَ الجسد الأكبر، وهو ما يرجع على الأرجح إلى أن الأفراد الأكبر حجمًا يتمتَّعون بنجاح أكبر في المنافسة على الغذاء أو التزاوُج. ونطاق أحجام الجسد الذي نراه في مجموعةٍ من الأنواع المترابطة قد يعكس الناتجَ الصافي لكلا النوعين من الانتخاب، ومع ذلك فمن المرجح أن يكون الانتخابُ على مستوى الأفراد داخل النوع العامل الأكثر أهميةً؛ لأنه يُنتِج النطاقَ المختلف من أحجام الجسد في المقام الأول، وهو يعمل عادةً على نحو أسرع من الانتخاب على مستوى النوع.

للانتخاب أهميته أيضًا في السياقات غير البيولوجية؛ فعند تصميم الماكينات وبرامج الكمبيوتر، وُجِد أن السبيل الأكثر كفاءةً في العثور على التصميم المثالي هو القيام

بتغييرات صغيرة عشوائية متتابعة على التصميم، مع الاحتفاظ بالنُّسَخ التي تُبلِي بلاءً حسنًا، وتنحية الأخرى جانبًا. هذه العملية تُستخدَم على نحوٍ متزايدٍ في حلِّ مشكلات التصميم الصعبة في الأنظمة المعقَّدة، وفي هذه العملية، ليس على المهندس أن يكون لديه تصميمٌ معين في عقله، وإنما الوظيفة المنشودة فحسب.

## أوجه التكيُّف والتاريخ التطوُّري

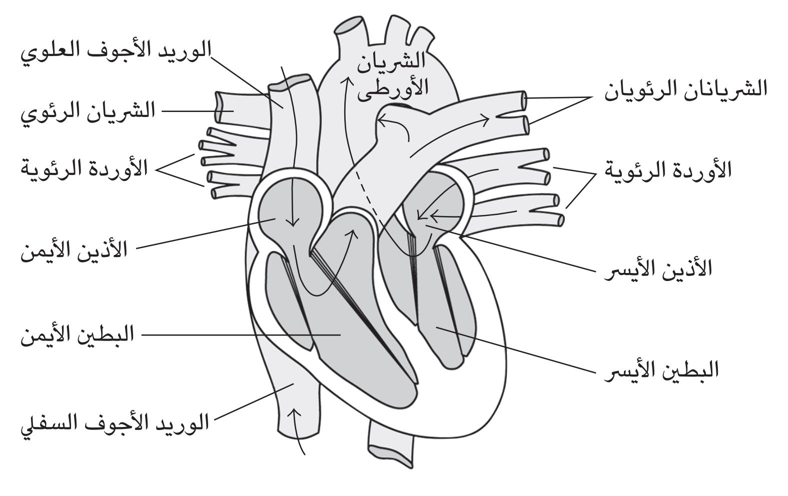
تفسِّر نظريةُ التطورِ عن طريق الانتخاب الطبيعي ملامحَ الكائنات بوصفها نتيجةً للتراكم المتتابِع للتغيرات، وكلُّ تغيُّر منها يمنح الكائنَ قدرًا أكبر من النجاح من حيث البقاء أو التكاثر. وتعتمد ماهيةُ التغيرات الممكنة على الحالة السابقة للكائن؛ فالطفرات يمكنها فقط أن تعدِّل نموَّ الحيوان أو النبات في حدود معينة، وهي محكومة بالبرامج التطورية الموجودة بالفعل، التي تؤدِّي إلى الكائن البالغ. وتُظهِر نتائجُ الانتخاب الاصطناعي، على النحو الذي يمارسه القائمون على استيلاد الحيوانات والنباتات، أنه من اليسير نسبيًّا تغييرُ أحجامِ أجزاءِ الجسم وأشكالها، أو إنتاجُ تغيُّرات بارزة في السمات السطحية مثل اللون الخارجي، كما هو الحال في سلالات الكلاب المختلفة. يمكن إنتاج التغيرات الجذرية بسهولةٍ عن طريق الطفرات، ولا يواجه علماءُ الوراثة العاملون في المختبرات أيَّ صعوبةٍ في خلْقِ سلالات من الفئران أو ذباب الفاكهة تختلف عن الأشكال العادية اختلافًا أكبر من ذلك الذي تختلفه الأنواعُ البرية بعضها عن بعض؛ فمن الممكن، على سبيل المثال، إنتاجُ ذبابات لها أربعة أجنحة بدلًا من جناحين كما في الحالة العادية، إلا أن هذه التغييرات الكبيرة تُعِيق في الغالب النموَّ الطبيعي، وتقلِّل من بقاء الكائن وخصوبته؛ ومِن ثَمَّ مِن المستبعَد أن يُحابِيَها الانتخاب الطبيعي، بل إن هذه التغييرات يميل القائمون على استيلاد الحيوانات والنباتات إلى تجنُّبِها (على الرغم من أن مثل هذه الطفرات استُخدِمت في تطوير سلالات غير معتادة من الحمام والكلاب، في المواضع التي تكون فيها صحةُ الحيوان ذاتَ أهميةٍ أقل في نظر المزارعين).

ولهذا السبب، نتوقَّع أن يُواصِل التطوُّر عملَه دائمًا من خلال عمل تعديلات صغيرة نسبيًّا على ما هو موجود من قبلُ، وليس عن طريق قفزات مفاجئة نحو حالات جديدة بشكل جذري. يتضح هذا على الأخص في حالة السمات المعقَّدة التي تعتمد على التعديل المتبادَل للعديد من المكونات المختلفة، كما في حالة العين (التي سنناقشها بمزيد من

التفصيل في الفصل السابع)، فإذا تغيَّر أحد المكونات بشكل جذري، فقد لا يعمل جيدًا بالتوافق مع الأجزاء الأخرى التي تظلُّ بلا تغييرٍ، وحين تتطوَّر أوجهُ تكيُّفٍ جديدة، ستكون دائمًا نُسَخًا معدَّلة من بنًى موجودةٍ من قبلُ، ولن تكون عادةً الحلولُ التصميميةُ الهندسيةُ العاملةُ بكفاءةٍ مثاليةً؛ فالانتخاب الطبيعي يشبه مهندسًا يحسِّن ماكيناته عن طريق التجريب والتعديل، وليس عن طريق الجلوس وتخطيط تصميمات جديدة بالكامل. إن مفكات البراغي الحديثة يمكن أن تناسِب الأعمالَ الدقيقة، وهي تملك رءوسًا عديدةً متنوِّعةً تلائم مختلفَ الأغراض، لكنَّ الأسلاف التطورية لتلك البراغي كانت عبارة عن قِطَع معدنية تُدار بمفكٍّ عن طريق فتحة في أحد طرفَيْها.

وبالرغم من أننا نندهش عادةً من الدقة والكفاءة التي تتسم بها أوجهُ التكيُّف في الكائنات الحية، فإن هناك أمثلة عديدة على التجريب غير الدقيق، تكشفها ملامحُ لا يكون لها معنًى منطقي إلا في إطار أصولها التاريخية. يرسم الرسَّامون الملائكةَ بأجنحة تخرج من أكتافهم، وهو ما يمكِّنهم من استخدام أذرعهم بشكل متواصل، لكن أجنحة كل أنواع الفقاريات التي تطير أو تنزلق على الهواء هي أطراف أمامية معدَّلة، ومِن ثَمَّ فقدَتِ الزواحفُ المجنَّحة والطيورُ والخفافيشُ القدرةَ على استخدام أطرافها الأمامية في كل الوظائف تقريبًا. وعلى نحو مشابه، يتسم تصميمُ قلوبِ الثدييات ودورتِها الدموية بملامح عجيبة تعكس تاريخًا من التعديل التدريجي من جهازٍ كان يقوم في الأصل بضخِّ الدم من القلب إلى خياشيم الأسماك، ثم إلى باقي الجسم (الشكل ٥-٣). ويكشف النموُّ الجنيني للجهاز الدوري بوضوحٍ عن صوره التطورية السالفة.

في بعض الأحيان، تطوَّرَتْ حلولٌ مشابهة لمشكلة وظيفية على نحو مستقلٍّ في مجموعات مختلفة؛ ما أدَّى إلى أوجه تكيُّف شديدة التشابُه، وفي الوقت نفسه يختلف بعضها عن بعض بدرجة كبيرة من حيث التفاصيل، بسبب تاريخها المتباين، كما في حالة أجنحة الطيور والخفافيش؛ ومن ثَمَّ، على الرغم من أن التشابه بين الكائنات المختلفة يكون راجعًا عادةً إلى القرابة بينها (كما هو الحال بيننا وبين القردة)، فإن الكائنات البعيدة بعضها عن بعض ولكنها تعيش في ظروف متشابهة، يمكنها أحيانًا أن تبدو أكثر شبهًا بعضها ببعض مقارَنةً بالأنواع الأقرب. وحين تكون أوجهُ الشبه والاختلاف القائمة على الشكل مضلِّلةً، يمكن اكتشافُ العلاقات التطورية الحقيقية باستخدام الأدلة المستقاة من التشابهات والاختلافات في تتابعات الدي إن إيه، على النحو الذي أوضحناه في الفصل الثالث؛ على سبيل المثال: تطوَّرت أنواعٌ عدة من الدلافين النهرية في أنهار كبرى




شكل ٥-٣: البنية العالية التعقيد لقلب الثدييات وأوعيته الدموية. لاحِظْ كيف أن الشريان الرئوي (الذي يوصل الدمَ إلى الرئتين) يتقوَّس على نحوٍ غير ملائم خلف الشريان الأورطى (الذي يوصل الدمَ إلى بقية الجسم) والوريد الأجوف العلوي (الذي يُعِيد الدمَ من الجسم إلى القلب).

في أجزاء مختلفة من العالم، وهي تتقاسم ملامحَ تميِّزها عن الدلافين المحيطية، خاصةً أعينها المختزلة؛ لأنها تعيش في مياه عَكِرة، وتعتمد بقدْرٍ أكبر في الملاحة على تحديد المواقع بالصَّدَى وليس الرؤية. وتبيِّن مقارناتُ الدي إن إيه أن أي نوع من أنواع الدلافين النهرية، يكون أكثرَ قربًا وشبهًا بالأنواع البحرية الموجودة في منطقته منه بالدلافين النهرية في الأماكن الأخرى. من المنطقي إذن أن تؤدِّي البيئات المتشابهة إلى أوجه تكيُّف متشابهة.

على الرغم من أوجه الشبه بين الأمرين، فإن الانتخاب الطبيعي يختلف عن عمليات التصميم البشرية بطرق عِدَّة؛ أحد الاختلافات يتمثَّل في أن التطور لا يملك بصيرةً مستقبليةً، فالكائنات تتطوَّر استجابةً للظروف البيئية السائدة في وقتٍ ما بعينه، وهذا قد تنتج عنه سماتٌ تؤدِّي إلى انقراضها حين تتغيَّر الظروف بشكل جذري. وكما سنبيِّن

لاحقًا في هذا الفصل، يمكن أن يؤدِّي التنافُسُ الجنسي بين الذكور إلى وجود هياكل تقلِّل بشكل كبير من قدرة هذه الذكور على البقاء، ومن الممكن أن يؤدِّي تغيُّرٌ بيئي غير مُوَاتٍ إلى تقليل القدرة على البقاء بشكل أكبر، وصولًا إلى نقطةٍ يعجز معها النوعُ عن الحفاظ على نفسه، وهذا هو السبب المُقترح لانقراض الأيل الأيرلندي، ذي القرون الضخمة. الكائنات ذات المدى العمري الطويل تتسم في المعتاد بخصوبة منخفضة للغاية، كما في حالة الطيور الجارحة الكبيرة كالنسر الأمريكي؛ إذ تضع أنثاه بيضة واحدة كلَّ عامين (سنناقش هذا بتفصيل أكبر في الفصل السابع). مثل هذه التجمعات يمكن أن تُبلِي بلاءً حسنًا ما دامَتِ البيئة مواتيةً، ونسبة الوفيات السنوية بين الأفراد البالغين المتناسِلين منخفضة. ومع ذلك، لو تدهورَتِ البيئةُ وزادت نسبةُ الوفيات، كما يحدث مثلًا بسبب تدخُّلات الإنسان، فقد يسبِّب هذا تدهورًا سريعًا في عدد أفراد النوع. يحدث هذا في الوقت الحالي للعديد من الأنواع، وتسبَّبَ بالفعل في انقراض أنواع كانت وفيرةَ العدد فيما مضى؛ على سبيل المثال: تم اصطياد الحمام الأمريكي المهاجِر البطيء التناسُل حتى نقطة الانقراض في القرن التاسع عشر، بالرغم من أن عدده كان يصل في الأصل إلى عشرات الملايين. أيضًا الأنواع التي تتطوَّر بحيث تعيش في نوع شديد الخصوصية من الموائل، تكون أكثرَ عرضةً لخطر الانقراض لو اختفى ذلك الموئل بسبب تغيُّرٍ بيئي، فمثلًا دِبَبة الباندا في الصين يَحِيق بها خطرٌ شديدٌ؛ لأنها تتناسَلُ ببطء، وتعتمد على نوع من الخيزران لا يوجد إلا في مناطق جبلية معيَّنة تتعرَّض في الوقت الحالي لقطْعِ ما بها من أشجار.

أيضًا لا ينتج الانتخابُ الطبيعي بالضرورة تكيُّفًا مثاليًّا؛ ففي المقام الأول، قد لا يكون هناك وقتٌ لضبط كل جانب من جوانب الآلة البيولوجية وصولًا إلى أحسن حالاتها، وهذا أمر مرجَّح على الأخص حين تَنتُج الضغوطُ الانتخابية عن تفاعلاتٍ بين زوجٍ من الكائنات، مثل العائل والطفيل؛ على سبيل المثال: أيُّ تحسُّنٍ في قدرة العائل على مقاوَمةِ العدوى يزيد الضغطَ الانتخابي على الطفيل كي يتغلَّب على هذه المقاومة، وهو ما يُجبِر العائلَ على تطوير إجراءاتِ مقاوَمةٍ جديدة، وهكذا دوالَيْك، بحيث يصير هناك «سباقُ تسلُّح تطوُّري». في مثل هذه المواقف، لا يكون بوسع أي الطرفين أن يظل متكيِّفًا على نحوٍ مثالي لوقت طويل؛ فعلى الرغم من قدرة جهازنا المناعي المذهلة على مكافحة العدوى البكتيرية والفيروسية، فإننا نظل معرَّضِين للإصابة بسلالات متطورة حديثًا من فيروسات الإنفلونزا والبرد. ثانيًا: يقيِّد جانبُ الضبط في الانتخاب الطبيعي

— تعديل ما هو موجودٌ من قبلُ — ما يستطيع الانتخابُ تحقيقَه، كما ذكرنا للتوِّ؛ فيبدو سخيفًا من منظور تصميمي أن تكون الخلايا التي تحمل المعلومات من الخلايا الحساسة للضوء، واقعةً أمام خلايا الشبكية الحساسة للضوء، وليس خلفها، بَيْدَ أن هذا حدث نتيجةً للكيفية التي تطوَّرَ بها هذا الجزءُ من العين بوصفه ناتجًا عن نموِّ الجهاز العصبي المركزي (تشبه عينُ الأخطبوط أعينَ الثدييات، لكن لها تركيبة أفضل؛ إذ توجد الخلايا الحسَّاسة للضوء أمام الأعصاب). ثالثًا: قد يكون لتحسُّنٍ في جانب واحد من عمل أي جهازٍ تكلفةٌ تأتي على حساب وظيفة أخرى، كما ذكرنا في حالة مقاومة الوارفارين، وهذا يمكن أن يُعِيق تحسينَ عملية التكيُّف. وسنورد المزيدَ من الأمثلة في موضع لاحق من هذا الفصل، وكذلك في الفصل السابع حين نناقش الشيخوخةَ.

## رصد الانتخاب الطبيعي

ذهب كلٌّ من داروين ووالاس إلى أن الانتخاب الطبيعي هو سبب التطور التكيفي، وذلك دون معرفة أمثلة على عمل الانتخاب في الطبيعة. على مدار الخمسين عامًا الماضية، رُصِدت حالاتٌ عديدة لعمل الانتخاب الطبيعي ودُرِست على نحوٍ تفصيلي، وهي تعزِّز على نحوٍ بالغٍ الأدلةَ المؤيِّدة لدور الانتخاب المحوري في عملية التطور، لكن لن تتَّسِعَ المساحةُ هنا إلا لعرض أمثلة معدودة. ثمة نوع مهم للغاية من الانتخاب الطبيعي يعمل في وقتنا الحالي ويسبِّب مقاومةً متزايدةً لدى البكتيريا للمضادات الحيوية، وهذا مثال على تغيُّرٍ تطوُّري خاضع لدراسة مكثفة؛ لأنه يهدِّد حياتنا، ويحدث بوتيرة سريعة وعلى نحو متكرر (للأسف). في اليوم الذي كتبنا فيه هذه الكلماتِ كانت عناوينُ الصحف تتحدَّث عن تفشِّي البكتيريا العنقودية المقاوِمة للميثيسيلين في مستشفى إدنبرة الملكي. وكلما استُخدِم مضاد حيوي على نطاق واسع، نجد سريعًا بكتيريا مقاوِمةً له. استُخدِمت المضاداتُ الحيوية على نطاق واسع للمرة الأولى في أربعينيات القرن العشرين، وسريعًا ما أُثِيرت المخاوفُ المتعلِّقة بمقاوِمة المضادات الحيوية من جانب علماء الأحياء الدقيقة، وفي عام ١٩٥٥ ورد في مقال منشور في مجلة الجمعية الطبية الأمريكية، التي تخاطِب الأطباءَ، أن الاستخدام غير المميز للمضادات الحيوية «محفوفٌ بخطرِ انتخابِ سلالات مقاوِمة»، وفي عام ١٩٦٦ (حين لم يغيِّر الناسُ سلوكَهم)، كتب عالِمٌ آخَر في مجال الأحياء

الدقيقة يقول: «أَمَا من سبيل لتوليد قلق جماعي كافٍ بحيث يمكننا مجابَهة موضوعِ مقاوَمةِ المضادات الحيوية؟»

ليس التطوُّر السريع لمقاومة المضادات الحيوية بالأمر المفاجئ؛ لأن البكتيريا تتضاعف بسرعة وتوجد بأعداد هائلة؛ بحيث إنَّ أيَّ طفرة يمكنها أن تجعل من المؤكد أن تحدث خليةٌ مقاوِمة في عدد قليل من البكتيريا في أي تجمُّع، وإذا تمكَّنَتِ البكتيريا من تحمُّلِ التغيُّر الذي سبَّبَتْه الطفرةُ في وظائفها الخلوية وتضاعَفَتْ، فمن الممكن أن يتكوَّن تجمُّع مقاوِم على نحو سريع. قد نأمل أن تكون المقاوَمةُ مكلِّفةً بالنسبة إلى البكتيريا، مثلما كان الحال في بدايته بالنسبة إلى مقاوَمةِ الوارفارين لدى الفئران، لكن كما هو الحال بالنسبة إلى الفئران لا يَسَعنا الاعتماد على بقاء هذا الأمر لفترة طويلة؛ فعاجلًا أم آجلًا، ستتطوَّر البكتيريا بحيث تستطيع البقاءَ في وجود المضادات الحيوية، دون أن تتحمَّل هي نفسها تكلفةً بالغةً؛ ومن ثَمَّ تكون فرصتنا الوحيدة هي استخدام المضادات الحيوية باعتدال، بحيث نقصر استخدامَها على المواقف التي تكون فيها مطلوبةً بالفعل، وأن نحرص على أن تُقتَل كلُّ البكتيريا المسبِّبة للعدوى بسرعةٍ، قبل أن يُتَاح لها وقتٌ كي تطوِّرَ مقاوَمةً. فإذا أوقَفَ أحدُ المرضى العلاجَ بينما لا تزال بعض البكتيريا موجودة، فسيتضمَّن ذلك التجمعُ لا محالةَ بعضَ البكتيريا المقاوِمة، التي يمكن أن تنتشر لتصيب أشخاصًا آخَرين. يمكن أيضًا أن تنتشر مقاوَمةُ المضادات الحيوية بين البكتيريا، حتى بين تلك التي تنتمي إلى أنواع مختلفة؛ فالمضادات الحيوية التي تُعطَى لحيوانات المزرعة، من أجل خفض معدلات العدوى وتعزيز النمو، يمكن أن تتسبَّبَ في انتشار المقاوَمة إلى العوامل المُمرضة البشرية. وحتى هذه التبعات لا تمثِّل المشكلةَ كلها، فالبكتيريا ذات طفراتِ المقاومة ليست مماثِلةً لبقية أفراد التجمع، لكن تكون لها في بعض الأحيان معدلاتُ تطافُرٍ أعلى من المتوسط، وهو ما يمكِّنها من الاستجابة على نحوٍ أسرع للانتخاب.

تتطوَّر مقاوَمةُ العقاقير ومبيدات الآفات كلما استُخدِمت العقاقيرُ في قتل الطفيليات أو الآفات، وقد خضعت مئاتُ الحالات حرفيًّا للدراسة في كلٍّ من الميكروبات والنباتات والحيوانات، وحتى فيروس الإتش آي في يتطافَرُ داخلَ مرضى الإيدز الذين يُعالَجون بالعقاقير، ويطوِّر مقاوَمةً تتسبَّب في النهاية في إفشال عملية العلاج. وفي محاولة لمنع هذا الأمر، يتم عادةً استخدامُ عقارَيْن بدلًا من عقار واحد في العلاج. ولأن الطفرات أحداث نادرة، فمن غير المرجح أن يحصل تجمُّعُ الفيروسات داخل المريض على كلتا الطفرتين بسرعة كبيرة، وإنْ كان هذا يحدث عادةً في نهاية المطاف.

هذه الأمثلة توضِّح الانتخابَ الطبيعي، ومع ذلك فهي تتضمَّن — شأن ما يحدث في الانتخاب الاصطناعي — مواقفَ تتغيَّر فيها البيئةُ نتيجةً للتدخل البشري. تتسبَّب أنشطةٌ بشرية عديدةٌ أخرى في تغيُّرات تطورية في الكائنات؛ فمثلًا يبدو أن قتل الأفيال من أجل الحصول على عاجها قد أدَّى إلى ارتفاع أعداد الأفيال العديمة الأنياب العاجية. في الماضي، كانت تلك مجرد حيوانات نادرةٍ تمثِّل استثناءاتٍ شاذةً، لكن في الوقت الحالي، في ظل الصيد المكثف، تستطيع هذه الحيوانات البقاءَ حيةً والتكاثر بصورة أفضل من الحيوانات الطبيعية؛ ونتيجةً لذلك تزداد أعدادُها داخل تجمعات الأفيال. أيضًا الفراشات الخطافية الذيل ذات الأجنحة الصغيرة، التي لا تجيد الطيران، يجري انتخابُها في الموائل الطبيعية المجزَّأة، والسبب المفترض لذلك هو أن الفراشات العاجزة عن الطيران لمسافات بعيدة من المرجح أن تبقى داخل رقع الموائل الملائمة. أيضًا نتسبَّبُ نحن البشر في ضغطٍ انتخابي على الحشائش كي تصير أعمارها عامًا واحدًا، مع إنتاج البذور بشكل سريع، وذلك حين نزيل الحشائشَ الضارة من حدائقنا وحقول المحاصيل. في أنواع مثل عشب القبأ الحولي، توجد أفراد تنمو بشكل أبطأ، ويمكنها العيش لعامين أو أكثر، بَيْدَ أنها في موقف ضعف واضح في منظومة تقوم على قطع الحشائش بشكل مركز. هذه الأمثلة لا تبيِّن فقط إلى أيِّ مدًى يمكن أن تكون التغيراتُ التطورية شائعةً وسريعةً، لكنها أيضًا تبيِّن أن أي شيء نفعله يمكن أن يؤثِّر على تطوُّر الأنواع المرتبطة بالبشر؛ ومع انتشار البشر في كل أنحاء العالم، فإن أنواعًا قليلة فقط هي التي ستنجو من هذه التأثيرات.

درس علماء الأحياء أيضًا حالاتٍ عديدةً من الانتخاب، كلها طبيعية بالكامل، ولا تتضمن أي تغيير في الموائل أو تدمير لها على يد البشر؛ أحد أفضل الأمثلة تلك الدراسةُ التي امتدَتْ على مدار ٣٠ عامًا، وأجراها كلٌّ من بيتر وروزماري جرانت على نوعين من شرشوريات داروين؛ شرشور الأرض وشرشور الصبار، وذلك على جزيرة دافني في أرخبيل جالاباجوس (انظر الفصل الرابع). يختلف هذان النوعان من حيث متوسط حجم المنقار وشكله، لكن هناك تنوعًا كبيرًا داخل كل نوع بالنسبة إلى كلتا السمتين، وخلال الدراسة، ركَّب فريق الزوجين جرانت حلقاتٍ على كل طير يفقس على الجزيرة وقاسوا حجمه، وتمَّ تحديد نسل كل أنثى لهذا الطائر. تمَّتْ متابعةُ كل طائر خلال حياته ورُبِط بين بقائه وبين القياسات الخاصة بحجم وشكل أجزاء الجسم. بيَّنَتْ دراساتُ النَّسَب أن التنوُّعَ في سمات المناقير له مركب وراثي قوي، بحيث يشبه الأبناءُ آباءَهم. وتبيِّن الدراسات التي أُجرِيت على سلوك الاغتذاء للطيور في البرية أن حجم المنقار وشكله

يؤثِّران على الكفاءة التي تتعامل بها الطيورُ مع أنواع البذور المختلفة؛ فالمناقير الكبيرة العميقة تمكِّن الطيورَ من تناوُل البذور الكبيرة أفضلَ من الصغيرة، والعكس صحيح في حالة المناقير القصيرة. إن جزر جالاباجوس معرَّضة لدوراتٍ من الجفاف الشديد، مرتبِطةٍ بظاهرة إل نينو، وهذه الدورات تؤثِّر على وفرة أنواع الغذاء المختلفة. في سنوات الجفاف، أغلبُ نباتات الغذاء تفشل في إنتاج البذور، باستثناء نوع بعينه يُنتِج بذورًا كبيرة للغاية؛ وهذا يعني أن الطيور ذات المناقير الكبيرة العميقة لها فرصة أفضل بكثير في البقاء مقارَنةً بغيرها، وهو ما رُصِد بالفعل من خلال إحصاء التجمع؛ فبعد دورة جفاف، تمتَّعَت الطيور البالغة في كلا النوعين بمناقير أكبر وأعمق من أفراد التجمُّع قبل الجفاف، وعلاوةً على ذلك، ورث أبناؤها هذه السمات، بحيث تسبَّبَ التغيُّرُ في اتجاه الانتخاب، الذي سببه الجفاف، في إحداث تغيُّر وراثي في تركيبة التجمع؛ أي تغيُّر تطوري حقيقي. اتفق نطاق هذا التغيُّر مع ذلك المتوقَّع من العلاقة المرصودة بين نِسَب الوفيات وسمات المناقير، مع الوضع في الحسبان درجة التشابه بين الآباء والأبناء. وبمجرد أن عادَتِ الظروفُ الطبيعية، تغيَّرَتِ العلاقةُ بين سمات المناقير والبقاء بحيث لم تَعُدِ المناقيرُ الكبيرة العميقة مُفضَّلةً، وتطوَّرَتِ التجمعات مرةً ثانية عائدةً إلى حالتها السابقة. ومع ذلك، حتى في السنوات التي لم تشهد جفافًا، كان هناك أيضًا المزيد من التغيُّرات البسيطة في البيئة، التي أدَّتْ إلى تغيرات في العلاقة بين الصلاحية وسمات المناقير، وبهذا كان هناك تذبذُبٌ ثابت في خصائص المناقير على مدار الثلاثين عامًا كلها، وانتهى المطافُ بتجمُّعاتِ كلا النوعين إلى حالةٍ تختلف بدرجةٍ كبيرة عن الحالة الأولية.

مثال آخَر دامغ يأتينا من الطريقة التي تتكيف بها الأزهار مع الحشرات والحيوانات التي تساعدها في عملية التلقيح؛ فلكي يتكاثر النبات مع نبات آخَر من نوعه، يجب اجتذاب ناقلات حبوب اللقاح نحو أزهار النبات، وأن تتم مكافأتها على عمل ذلك (من خلال الرحيق أو مقدار إضافي من حبوب اللقاح يمكنها أن تأكلها)، وهو ما يضمن أنها ستزور النباتات الأخرى من النوع نفسه. تتطور النباتات والحيوانات المشارِكة في هذا التفاعل بحيث تحصل لنفسها على أفضل ما يمكنها؛ في حالة زهرة الأوركيد مثلًا، من المهم أن تصل العثة الناقلة لحبوب اللقاح إلى أعماق الأزهار، كي تعلق كتلةُ غبار الطلع (يُطلَق عليها اسم «الغُرَيْضَة») في ثباتٍ برأس العثة حين تزور النبات؛ فهذا يضمن اتصالَ كتلة غبار الطلع اتصالًا جيدًا بالجزء المناسب من الزهرة التي ستزورها العثةُ بعد ذلك، بحيث يحدث التواصُلُ بشكل صحيح وتخصب حبوبُ اللقاح الزهرةَ. إن الحاجة إلى

إبقاء الرحيق بعيدًا عن متناول ألسنة العثث تولِّد انتخابًا طبيعيًّا على طول الأنابيب؛ ومِن ثَمَّ من المفترض أن تتسم الأزهار ذات الأطوال غير الطبيعية لأنابيب الرحيق بخصوبة أقل؛ فالأزهار ذات الأنابيب الأقصر ستمكِّن العثةَ من امتصاص الرحيق دون أن تلتصق بها كتلُ غبارِ الطلع أو تنفصل عنها لو كانت آتيةً بها من زهرة أخرى، والأزهار ذات الأنابيب الأطول ممَّا ينبغي ستُهدِر الرحيقَ، وكأنها عُلَب عصير طويلة تعجز الماصات القصيرة عن استخراج ما بها من عصير. في صناعة علب العصير، يفيد الهدْرُ بائعي العصير؛ إذ يمكِّنهم من بيع كميات أكبر، لكن النباتات تفقد الطاقةَ والماء والمغذيات إذا صنعَتْ رحيقًا عديمَ الفائدة، وهذه الموارد يمكن توجيهُها لاستخداماتٍ أفضل.

في نبات سيف الغراب الموجود في جنوب أفريقيا، الذي يُنتِج زهرةً واحدة فقط، كانت النباتاتُ ذات الأنابيب الطويلة تنتج ثمارًا بوتيرة أعلى من النباتات ذات الأنابيب المتوسطة الطول، وأيضًا كان بكل ثمرة عددٌ أكبر من البذور من المتوسط. يبلغ طول أنابيب هذا النوع في المعتاد ٩٫٣ سنتيمترات، وزوَّارها من العثث الحرشفية الأجنحة يتراوح طولُ ألسنتها بين ٣٫٥ و١٣ سنتيمترًا. كانت العثث التي لا تملك حبوبَ لقاح على ألسنتها تملك أطولَ الألسنة. أما أنواع العثث الأخرى الموجودة في المنطقة لكنها لا تلقح هذا النوع، فيقلُّ متوسطُ طول ألسنتها عن ٤٫٥ سنتيمترات؛ يبيِّن هذا قوةَ الانتخاب التي تدفع الأزهارَ والعثث إلى تكيُّف بعضها مع بعض، بحيث تصل إلى نطاقات متطرفة في بعض الحالات. بعض أزهار الأوركيد في مدغشقر يصل طولُ غددها الرحيقية إلى ٣٠ سنتيمترًا، ويصل طولُ ألسنة الحشرات الملقِّحة إلى ٢٥ سنتيمترًا؛ في هذه الأنواع، تم استيضاح الانتخاب الواقع على سمة الطول من خلال تجارب تمَّ فيها ربْطُ أنابيب الرحيق من أجل تقصيرها، وهو ما أدَّى إلى انخفاض نسبة نجاح استخراج العثث للرحيق.

يؤثِّر نوع مشابه من الانتخاب والانتخاب المضاد على نوعنا البشري من حيث علاقته بالطفيليات. خضعَتْ تكيفاتٌ بشرية عديدة مع الملاريا للدراسة جيدًا، ومن الواضح أننا طوَّرنا عددًا من الدفاعات المختلفة، منها تغيرات في خلايا الدم الحمراء لدينا، التي يقضي فيها طفيلُ الملاريا جزءًا من دورة حياته المعقَّدة. وكما هو الحال في مقاومة الوارفارين لدى الفئران، قد تكون للدفاعات تكلفةٌ مرتفعة أحيانًا؛ فمرضُ أنيميا خلايا الدم المنجلية، الذي يكون قاتلًا في المعتاد إذا لم يُعالَج المريض، يتضمَّن تغيُّرًا في الهيموجلوبين (وهو البروتين الأساسي لخلايا الدم الحمراء، المسئولة عن حمل الأكسجين إلى أجزاء الجسم)، وهذه الهيئة المتغيِّرة (هيموجلوبين إس) هي صورة مختلفة للجين الذي يشفِّر

الهيموجلوبين الشائع لدى البالغين (هيموجلوبين إيه)، والاختلاف بين النسختين سببه اختلاف في حرف واحد من حروف الدي إن إيه؛ والأفراد الذين تكون نسختا الجين لديهم من النوع إس يُعانون أنيميا خلايا الدم المنجلية، فتتشوَّه خلايا الدم الحمراء لديهم وتسدُّ الأوعية الدموية الدقيقة. أما الأشخاص الذين يحملون نسخةً طبيعية من الهيموجلوبين إيه، ونسخةً من الهيموجلوبين إس، فلا يتأثَّرون سلبًا، بل يملكون مقاوَمةً أعلى للملاريا مقارَنةً بالأشخاص الذين تكون نسختا الهيموجلوبين لديهم من النوع إيه. إذن فالمرض الذي يعاني منه الأشخاصُ الذين يحملون النسختين إس هو تكلفة مقاوَمةِ الملاريا، ويمنع الشكل إس من الانتشار بين أفراد التجمع، حتى في المناطق ذات معدلات الإصابة المرتفعة بالملاريا. إن نُسَخ إنزيم نازعة هيدروجين الجلوكوز ٦ فوسفات المتغيرة التي تساعد أيضًا في الحماية من الملاريا (انظر الفصل الثالث) لها تكلفة هي الأخرى، على الأقل حين يتناول الأشخاصُ الذين يحملون هذه النُّسَخَ المتغيِّرة أطعمةً أو عقاقير معينة، وهو ما يسبِّب ضررًا لخلايا الدم الحمراء لديهم، بينما النسخة غير المقاوِمة من الإنزيم تَحُول دون حدوث ذلك؛ ومع ذلك تبدو مقاوَمةُ الملاريا دون تكلفة، أو بتكلفة بسيطة، أمرًا ممكنًا. إن الزمرة الدموية «دوفي−»، وهي سمة أخرى لخلايا الدم الحمراء، تنتشر في مناطق كثيرة من أفريقيا، والأشخاص الذين يحملون هذه الزمرة أقلُّ عرضةً للإصابة بأنواع معينة من الملاريا من غيرهم من الأشخاص الذين يحملون النوع البديل «دوفي+».

توضِّح مقاوَمةُ الملاريا نتيجةً شائعة؛ أن استجابات مختلفة يمكن أن تحدث نتيجةً لضغط انتخابي واحد، في حالتنا هذه مرض خطير. بعض حلول المشكلة التي طرحها وجود الملاريا أفضلُ من البعض الآخَر؛ لأن هناك تكاليف أقل للأفراد المعنيِّين. في الواقع، هناك العديد من التنويعات الجينية الأخرى موجودة في تجمعات بشرية مختلفة تقدِّم مناعةً ضد الملاريا، ويبدو أن مسألة اختيار أنواع الطفرات التي يرسخها الانتخابُ في أي منطقة بعينها خاضعةٌ للمصادفة بدرجة كبيرة.

الأمثلة التي ناقشناها للتوِّ توضِّح الاستجاباتِ الانتخابيةَ للتغيرات في بيئة الحيوانات والبشر والنباتات؛ فلربما يظهر مرضٌ ما، ويقع ضغط انتخابي على تجمعٍ ما بحيث يتطوَّر أفرادٌ أكثر قدرةً على المقاومة؛ أو ربما تطوِّر عثةٌ ما لسانًا أطول، وتستطيع امتصاصَ الرحيق من الزهور دون أن تعلق بها حبوبُ اللقاح، وبالتبعية تطوِّر الزهرةُ أنابيبَ رحيقٍ أطولَ. في هذه الأمثلة، يُغيِّر الانتخابُ الطبيعي الكائنَ، على النحو الذي

ذكره داروين في مقولته عام ١٨٥٨، التي أوردناها في الفصل الثاني؛ ومع ذلك، يعمل الانتخاب الطبيعي في أحيان كثيرة على منع التغييرات من الحدوث. في الفصل الثالث، حين وصفنا آلة البروتينات والإنزيمات الخلوية، ذكرنا أن الطفرات تحدث ويمكنها التقليل من أهمية هذه الوظائف؛ وحتى في بيئة ثابتة، يعمل الانتخابُ في كل جيل على مواجهة الجينات الطافرة (التي تشفِّر بروتينات طافرة أو بروتينات يتمُّ التعبيرُ عنها في الموضع أو الوقت الخطأ، أو بالمقدار الخطأ). يظهر أفراد جُدُد يحملون طفراتٍ في كل جيل، لكنَّ الأفراد غير الطافرين يتركون عادةً نسلًا أكبر عددًا، ومِن ثَمَّ تظَلُّ جيناتُهم هي الأكثر شيوعًا، ويظل معدل النُّسَخ الطافرة قليلًا داخل التجمع. هذا هو الانتخاب «التثبيتي» أو «المُنقِّي»، الذي يعمل على أن تسير الأمور على أفضل نحو ممكن؛ مثالٌ على هذا الجينُ الذي يشفِّر أحدَ البروتينات المشتركة في عملية تخثُّر الدم، بعضُ التغيرات في تتابُع ذلك البروتين تؤدِّي إلى عجز الدم عن التخثُّر عقب حدوث أي جرح (الهيموفيليا أو الناعور)، وحتى وقت قريب — حين تفهَّمْنا مسبِّباتِ الهيموفيليا، وصار من الممكن مساعدة المصابين بهذا المرض عن طريق حقْنِهم ببروتينات معامل التخثُّر — كانت هذه الحالةُ قاتلةً أو تهدِّد البقاءَ على نحو خطير؛ وقد وصف علماءُ الوراثة الطبية آلافًا من هذه التنويعات الجينية ذات معدلات الحدوث المنخفضة والتأثيرات الضارة، التي تؤثِّر على كل سمة يمكن تصوُّرها.

يحدث الانتخاب التثبيتي لو ظلَّتِ البيئةُ ثابتةً إلى حدٍّ كبير، بحيث إن الانتخاب في الماضي أُتِيح له الوقت لتعديل صفةٍ ما إلى الحالة التي تمنح صلاحيةً مرتفعةً. يمكن رصْدُ هذا الانتخاب وهو يعمل اليومَ على سمات متنوعة بشكل متواصل للكائنات، وثمة مثال لهذا الأمر خضع لدراسة جيدة وهو وزن البشر عند مولدهم. حتى في وقتنا الحالي، الذي يموت فيه عدد قليل للغاية من الأطفال، يكون الأطفال ذوو الأوزان المتوسطة هم أصحاب أعلى معدلات البقاء أحياءً، أما العددُ القليل من وفيات الأطفال فيشمل بالأساس الأطفالَ الضئيلي الحجم، وبعضَ الأطفال ذوي الحجم الضخم للغاية. رُصِد أيضًا الانتخابُ التثبيتي في أنواع من الحيوانات، مثل الطيور والحشرات، بعد وقوع العواصف الشديدة، حين يكون الأفرادُ الباقون أحياءً في الغالب هم أصحاب الأحجام المتوسطة، بينما يموت أصحابُ أصغر الأحجام وأكبرها. وحتى الانحرافاتُ الطفيفة عن الوضع المثالي يمكن أن تخفِّض القدرةَ على البقاء أو الخصوبة؛ ومن ثَمَّ يكون من المنطقي أن يكون تكيُّفُ الكائنات مع بيئتها أمرًا مثيرًا للإعجاب عادةً. وكما أوضحنا

في الفصل الثالث، يبدو الأمر أحيانًا كما لو أن أبسط التفاصيل يمكن أن تكون مهمةً. يتمُّ عادةً الوصولُ إلى حالةٍ تُقارِبُ الحالةَ المثالية، مثل الدقة الاستثنائية التي تحاكي بها الفراشاتُ أوراقَ الشجر أو تحاكي بها اليرقاتُ الأغصانَ. أيضًا يصير الانتخابُ التثبيتي منطقيًّا من واقع الملاحظة التي تقضي بأن الأنواع عادةً لا تُظهِر إلا تغيرًا تطوريًّا بسيطًا، فما دامت بيئتها لا تفرض عليها تحدياتٍ جديدةً، يميل الانتخاب إلى إبقاء الأمور كما هي؛ وبناءً على هذا يصير ثباتُ شكل بعض الكائنات على امتداد فترات تطوُّرية طويلة — مثل تلك الكائنات المسمَّاة «الحفريات الحية» التي يشبه أفرادُها الحاليون الحفرياتِ البعيدةَ للغاية للنوع نفسه — أمرًا مفهومًا.

## الانتخاب الجنسي

الانتخاب الطبيعي هو التفسير الوحيد للتكيف الذي صمد أمام الاختبار التجريبي، ومع ذلك فالانتخاب لا يزيد بالضرورة القدرةَ الإجمالية على البقاء أو عددَ الذرية المُنتَجة من قِبَل التجمُّع إجمالًا؛ فحين يكون هناك تنافُسٌ، قد تقلِّل السماتُ التي تمنح الفردَ النجاحَ في المنافسة على أحد الموارد المحدودة من قدرة الجميع على البقاء. وإذا صار أكثر أنواع الأفراد نجاحًا هو الشائع داخل التجمع، فقد تنخفض احتمالية قدرة التجمع على البقاء. وليست الأمثلة الخاصة بالتبعات غير التكيفية للمنافسة مقصورةً على المواقف البيولوجية؛ فكلنا نعرف ما تتسم به الإعلانات التنافسية من تطفُّل وذوق سيئ.

أحد أفضل الأمثلة البيولوجية المفهومة للتنافس هو الانتخاب المؤثِّر على قدرة الذكور على الحصول على إناث؛ ففي العديد من أنواع الحيوانات، لا يخلف كلُّ الأفراد المتَّسِمين بالخصوبة ذريةً، وإنما يخلِّفها فقط أولئك الذين ينجحون في المغازلة و(أو) التنافس مع الذكور الآخرين. وفي بعض الأحيان، لا تقبل الإناثُ إلا الذكورَ «المهيمِنين». وحتى ذكورُ ذباب الفاكهة يتعيَّن عليهم مغازلة الإناث — بالرقصات والأغنيات (التي تنتجها بواسطة الخفق بأجنحتها) والروائح — قبل أن يُسمَح لها بالتزاوج، ومع ذلك ليس النجاح مضمونًا (وهو ليس بالأمر المفاجئ؛ نظرًا لأن الإناث يجب أن تكون شديدةَ الانتقاء، وتتجنَّب أن تقبل ذكورًا من نوع مختلف). وفي ثدييات عديدة، كالأسود، هناك طبقات اجتماعية من حيث القدرة على التزاوج، وتتسم الإناث بالانتقاء الشديد؛ ومِن ثَمَّ يتباين الذكور من حيث نجاحهم التكاثري؛ وعليه، سيُحابي الانتخابُ الطبيعي السماتِ المرتبطةَ بالهيمنة الذكورية داخل الترتيب الهرمي، أو تلك المرتبطةَ بجاذبية الذكور في

نظر الإناث. يملك ذكور الغزلان قرونًا أكبر، تُستخدَم في القتال فيما بينها، وبعض الأنواع يملك وسائل ترهيب أخرى، مثل الزئير المرتفع. وما دامت هذه الصفات قابلةً للتوارث (وهو الأمر الواقع كما رأينا أعلاه)، فإن الذكور ذوي الصفات التي تجعلهم ناجحين في التزاوج سيُمرِّرون جيناتهم إلى العديد من أفراد ذريتهم، بينما ستكون للذكور الآخَرين ذريةٌ أقلُّ عددًا.

قد يطوِّر الجنسان كلاهما سماتٍ بواسطة هذا «الانتخاب الجنسي»، وهذا يفسِّر على الأرجح الريشَ الزاهي للعديد من الطيور؛ ومع ذلك، في العديد من الأنواع تكون هذه السمات مقصورةً على الذكور (الشكل ٥-٤)، وهو ما يقترح أن هذه السمات ليست في حد ذاتها أوجهَ تكيُّف ملائمة لبيئة النوع. بالتأكيد لا يبدو أن الكثير من هذه السمات الذكورية يساعد على البقاء، وهي غالبًا ما تفرض تكاليف بسبب قدرة البقاء المنخفضة لحامليها من الذكور؛ فذكور الطواويس، ذات الذيول الضخمة الجميلة، لا تُجِيد الطيران، وكانت ستقدر على الهرب من المفترسين بشكل أفضل لو أن ذيولها كانت أصغر حجمًا. والطواويس نوع غير ملائم للدراسات التجريبية الخاصة بالديناميكا الهوائية، لكن ثبت أن ذيول السنونو تكون أطول من الطول المثالي للطيران، وتفضِّل الإناثُ الذكورَ ذات الذيول الطويلة، بل إن سمات المغازلة الذكورية الأقل إبهارًا تجلب معها عادةً أخطارًا متزايدة؛ على سبيل المثال: بعض أنواع الضفادع الاستوائية تتغذَّى عليها الخفافيش، وهذه الخفافيش ترصد ذكورَ الضفادع التي تغني أغنيات المغازلة؛ وحتى دون هذه الأخطار، عادةً ما تبذل الذكور المغازِلة مقدارًا هائلًا من الجهد، يمكن توظيفه خلاف ذلك في البحث عن الطعام مثلًا، وتكون عادةً في حالة جسمانية سيئة للغاية في نهاية موسم التزاوج.

أدرَكَ داروين هذا الأمر واعتبر أن الانتخاب في سياق المغازَلة مختلف عن أغلب المواقف الأخرى، واستحدَثَ مصطلحَ الانتخاب الجنسي كي يوضِّح هذا الاختلاف. وكما قلنا للتوِّ، من غير المرجح أن تكون ذيولُ الطواويس من أوجه التكيُّف، وذلك على أُسُس بديهية (فمثل هذه الذيول لا تبدو تصميمًا جيدًا لحيوان يطير)، وأيضًا لأنها لو كانت مفيدة، لَامتلكَتْها الإناثُ هي الأخرى؛ ومن ثَمَّ يبدو أن الانتخاب قد قايَضَ القدرةَ المنخفضة على الطيران بالنجاح الذكوري المرتفع في التزاوُج لدى الطاوس، وهو نوع يحمل فيه التزاوجُ التنافسي أهميةً كبيرة. وعليه يوضِّح الانتخاب الجنسي أن كلمة الصلاحية، كما هي مستخدَمة في علم الأحياء، تعني عادةً شيئًا مختلفًا عمَّا تعنيه وفْقَ



شكل ٥-٤: نتاج الانتخاب الجنسي، كما هو موضَّح في كتاب داروين «أصل الإنسان والانتخاب الجنسي». يبيِّن الشكلُ ذكرًا وأنثى من النوع نفسه من طيور الجنة، وهو يوضِّح الزينةَ التي يتَّسِم بها الذكرُ في مقابل افتقار الأنثى لأي مظاهر خارجية جذَّابة.

الاستخدام الدارج للكلمة؛ فذَكَرُ الطاوس الذي يمثِّل له الذيلُ إعاقةً، ليس «صالحًا» من منظور القدرة على الطيران أو العَدْو (على الرغم من أنه قد يكون عاجزًا عن إنتاج ذيل جميل لو لم يتمتَّع بالتغذية والصحة الطيبة)، لكن في لغة علم الأحياء التطوري يتَّسِم الطاوس بصلاحية مرتفعة، فدون ذيله الكبير كانت الإناث ستتزاوج مع الذكور الآخَرين، وكانت خصوبته ستنخفض.

الفصل السادس

# تكوُّن الأنواع وتشعُّبها

من أكثر الحقائق البيولوجية المعروفة شيوعًا حقيقةُ انقسامِ الأشكال الحية إلى أنواع متباينة مختلفة على نحوٍ يمكن تمييزُه؛ فحتى الملاحظةُ العابرة للطيور التي تعيش في أي بلدة في شمال غربي أوروبا، مثلًا، تُبيِّن وجودَ العديد من الأنواع؛ كأبي الحناء، والشحرور، وطائر السمنة المغرِّد، وطائر السمنة الدبق، والقرقف الأزرق، والقرقف العظيم، والحَمَام، وعصفور الدوري، والشرشور الجبلي، والزرزور، وغيرها الكثير. وكلُّ نوعٍ مختلفٌ عن الأنواع الأخرى من حيث الشكل وحجم الجسد ولون الريش والتغريد وعادات الغذاء وبناء الأعشاش، ويمكن العثور على طيف مختلف، وإن كان عريضًا على نحو مشابه، من أنواع الطيور في شرقي أمريكا الشمالية. يتزاوج ذكور وإناث كلِّ نوع مع أفراد النوع ذاته فقط، وبطبيعة الحال ينتمي نسْلُهم إلى النوع نفسه الذي ينتمي إليه الآباء. وفي أي موقع جغرافي بعينه من الممكن تقسيم الحيوانات والنباتات المتكاثِرة جنسيًّا بسهولة إلى مجموعات متمايزة (على الرغم من أن الملاحظة الدقيقة تكشف أحيانًا عن وجود أنواع لا يوجد بينها سوى فروق تشريحية طفيفة). يمكن للأنواع المختلفة التي يعيش بعضها إلى جوار بعض في المكان نفسه أن تظلَّ متمايِزة؛ نظرًا لعدم حدوث تزاوج بين أفرادها، وأغلبُ البيولوجيين يعتبرون غيابَ هذا التهجين (ما يُسمَّى «الانعزال التكاثري») المعيارَ الأفضل لتحديد الأنواع المختلفة. إلَّا أن الموقف أكثر تعقيدًا في حالة الأنواع التي لا تتكاثر في المعتاد عن طريق التزاوج الجنسي، كما هو الحال في أنواع كثيرة من الميكروبات، وسنُرجِئ مناقشةَ هذه الأنواع إلى موضع لاحق.

## طبيعة الاختلافات بين الأنواع

على الرغم من أن هذا التقسيم للكائنات الحية إلى أنواع متمايزة أمر مألوف للغاية، لدرجة أننا نأخذه كأمر مسلَّم به — مثل قوة الجاذبية — فإنه ليس أمرًا تفرضه الضرورةُ على نحو بديهي؛ فمن السهل أن نتخيَّلَ عالَمًا لا يوجد فيه مثل هذا الاختلاف الحاد، وبالنسبة إلى مثال الطيور المذكور للتوِّ، فمن الممكن أن توجد كائناتٌ تجمع بين سمات أبي الحناء والشرشور، مثلًا، بنِسَب مختلفة، وفيها يمكن للتزاوج بين أي ذكر وأنثى أن يُنتِج نسلًا له تجميعاتُ سماتٍ مختلفة على نحو عريض. فلو لم تكن هناك حواجز تمنع التزاوُجَ بين أفراد الأنواع المختلفة، لَمَا وُجِدَ تنوُّعُ الحياة الذي نراه الآن في العالَم، وكان سيوجد شيء أشبه بسلسلة متصلة من الأشكال. في الواقع، حين انهارَتِ الحواجزُ التي تمنع التزاوُجَ، لسبب أو لآخَر، بين نوع وآخَر كانا منفصلين تمامًا فيما سبق؛ نتج بالفعل مثل هذا النسل الشديد التنوُّع.

ومن ثَمَّ يواجه التطوريون مشكلةً أساسيةً تتمثَّل في تفسير الكيفيةِ التي صارت بها الأنواع متمايِزةً، وسببِ وجود الانعزال التكاثري، وهذا هو الموضوع الأساسي لهذا الفصل؛ لكن قبل الخوض فيه سنصف أولًا بعضَ الطرق التي تُمنَع بها بعضُ الأنواع القريبة الصلة من تكاثُر بعضها مع بعض. في بعض الأحيان يكون المانع الأساسي ببساطة هو الاختلاف في الموطن أو في وقت تكاثُر الأنواع؛ ففي النباتات، على سبيل المثال، يوجد دائمًا وقت مميَّز قصير للإزهار كلَّ عام؛ ومن ثَمَّ تعجز عن التكاثُرِ الأنواعُ التي لا تتوافَقُ أوقاتُ إزهارها معًا. وفي الحيوانات، قد يمنع استخدامُ مواقع تكاثُر مختلفة أفرادَ الأنواع المختلفة من تزاوُج بعضهم مع بعض. وفي أحيان كثيرة تمنع السماتُ البالغة الدقة للكائنات — التي لا يمكن اكتشافُها إلا من خلال الدراسات التفصيلية لتاريخ الأنواع الطبيعي — الأفرادَ المنتمين إلى أنواع مختلفة من تزاوُج بعضهم مع بعض بنجاح، حتى لو وُجِدوا معًا في المكان نفسه والوقت نفسه؛ على سبيل المثال: قد يعزف أفراد أحد الأنواع عن مغازَلة أفرادٍ من النوع الآخَر بسبب عدم إنتاج الرائحة أو الأصوات الصحيحة، أو قد تتباين عروضُ المغازَلة الخاصة بالنوعين. الحواجزُ السلوكية للتزاوُج واضحةٌ في العديد من الحيوانات، فالنباتاتُ مثلًا تملك وسائلَ كيميائية لرصْدِ حبوب اللقاح الخاصة بالأنواع الخطأ ورفْضِها. وحتى لو حدث التزاوُجُ، فقد يفشل الحيوان المنوي لنوعٍ ما في تخصيب بويضة أنثى من نوعٍ آخَر.

ومع ذلك، بعض الأنواع تكون قريبةً للغاية بعضها من بعض لدرجة تمكِّنها من التزاوج أحيانًا، خاصةً إذا لم تُتَحْ لها فرصةُ اختيارِ أحد أفراد نوعها (على سبيل المثال: الكلاب وذئاب القيوط وابن آوى المذكورة في الفصل الخامس). لكن في العديد من هذه المواقف، يفشل الجيل الأول من الأفراد الهجينة في النمو، فالتهجين التجريبي بين أفراد تنتمي إلى أنواع مختلفة يُنتِج عادةً أفرادًا مهجَّنة تموت في مرحلة مبكرة من مراحل النمو، بينما تتطوَّر عادةً الأفراد الناتجة عن تزاوُج أفرادٍ من النوع نفسه حتى تصل إلى النضج. في بعض الأحيان تستطيع الأفراد الهجينة البقاءَ على قيد الحياة، لكن بمعدل أقل كثيرًا من الأفراد غير الهجينة، وحتى حين تكون الأفراد الهجينة قادرةً على الحياة، فإنها كثيرًا ما تكون عقيمةً ولا تُنتِج أيَّ نسلٍ يمكن أن يمرِّر جيناتها إلى الأجيال المستقبلية، والبغال (التي هي نتاج تهجين الحمير مع الخيول) مثال شهير على ذلك؛ فالعقم أو الانعدام التام لقابلية الحياة للأفراد الهجينة يعزل أحد النوعين عن الآخر.

## تطوُّر حواجز التزاوُج المختلط

على الرغم من أن هذه الوسائل المختلفة لمنع التزاوج المختلط (بين الأنواع المختلفة) مألوفة، فإنه من العسير للغاية فهْمُ الكيفية التي تطوَّرَتْ بها؛ وهذا هو مفتاحنا لفهم أصل الأنواع. وكما أشار داروين في الفصل التاسع من كتابه «أصل الأنواع»، فإنه من غير المرجَّح بشدة أن يكون العقم أو انعدام قابلية الحياة لدى هجائن الأنواع المختلفة نتاجًا مباشِرًا للانتخاب الطبيعي؛ إذ إنه لا توجد أي مزية للفرد الذي ينتج نسلًا عقيمًا أو غيرَ قابل للحياة لو أنه تزاوج مع فرد من نوع مختلف. بطبيعة الحال هناك فائدة من تجنُّب التزاوُج مع أفراد نوعٍ آخَر لو أن الأفراد الهجينة الناتجة عن هذا التزاوج كانت عقيمة أو غير قابلة للحياة، لكن من الصعب أن نرى كيف يمكن أن يمثِّل هذا أي مزية في الحالات التي استطاعت فيها الأفراد الهجينة البقاء بشكل طيب للغاية؛ ومن ثَمَّ يبدو مرجَّحًا أن أغلب حواجز التزاوج المختلط هي نتاجٌ جانبيٌّ للتغيرات التطورية، التي وقعت بعد أن صارت التجمعات منعزلًا بعضها عن بعض، عن طريق الانفصال الجغرافي أو الإيكولوجي.

على سبيل المثال، تخيَّلْ أن هناك نوعًا من شرشوريات داروين التي تعيش على إحدى جزر أرخبيل جالاباجوس، وافترِضْ أن عددًا قليلًا من أفراد هذا النوع طار إلى جزيرة أخرى لم يسبق لهذا النوع أنْ سكَنَها، ونجح في تأسيس تجمع جديد هناك؛

إذا كانت أحداث الهجرة هذه نادرةً للغاية، فسيتطور التجمعان، الجديد والأصلي، على نحو مستقلٍّ أحدهما عن الآخَر، وبفعل عمليات التطافر والانتخاب الطبيعي والانحراف الوراثي سيتباين التركيب الوراثي لكلا التجمعين. ستتعزَّز هذه التغيرات بفعل الاختلافات البيئية التي يمر بها كلا التجمعين ويتكيفان معها؛ على سبيل المثال: تختلف النباتات المتاحة لأنواع الطيور الآكِلة للبذور من جزيرة لأخرى، بل قد يتباين أيضًا أفرادُ النوع نفسه من الشرشوريات بين الجزر من حيث أحجام المناقير بطرقٍ تعكس الاختلافاتِ في وفرة الغذاء.

إن ميل تجمعات النوع نفسه للاختلاف بحسب الموقع الجغرافي، عادةً بطرق تكيفية بشكل واضح، يُطلَق عليه اسم «التنوُّع الجغرافي»، ومن أمثلة هذا التنوُّع الجلية لدى البشر تلك الاختلافاتُ البدنية الطفيفة العديدة بين الأعراق، علاوةً على الاختلافات المحلية الأصغر في ملامح مثل صبغة الجلد والشكل. يوجد مثل هذا التنوُّع في العديد من أنواع الحيوانات والنباتات الأخرى ذات النطاقات الجغرافية الواسعة. في أي نوع يتألَّف من مجموعة من التجمعات المحلية، يوجد دائمًا قدرٌ من هجرة الأفراد بين المواقع المختلفة، ويتباين مقدارُ الهجرة تباينًا ضخمًا بين الكائنات، فالحلزون له معدل هجرة منخفض للغاية، بينما الطيور والعديد من الحشرات الطائرة لها قدرةٌ عالية على الانتقال. وإذا استطاع الأفراد المهاجرون التزاوُجَ مع أعضاء التجمع الموجودين في المكان الذي يصلون إليه، فسيشاركون في التركيب الجيني لهذا التجمع؛ ومن ثَمَّ تكون الهجرةُ قوةَ تجانُسٍ، تعارِضُ ميلَ التجمعات المحلية للتشعُّب وراثيًّا بفعل الانتخاب أو الانحراف الوراثي (انظر الفصل الثاني). ستتشعب التجمعات المنتمية إلى أحد الأنواع بشكلٍ ما بعضها من بعض، اعتمادًا على مقدار الهجرة، وعلى القوى التطورية التي تعزِّز الاختلافاتِ بين التجمعات المحلية. ويمكن أن يتسبَّب الانتخابُ القوي في اختلاف التجمعات حتى المتلاصقة منها؛ على سبيل المثال: تعدين الرصاص أو النحاس يلوِّث التربةَ بهذه المعادن التي يمكن أن تكون سامةً للغاية للنباتات، لكنْ في الأراضي الملوَّثة المحيطة بالعديد من المناجم تطوَّرَتْ أنواعٌ قادرةٌ على تحمُّل المعادن؛ وفي غياب المعادن، تنمو النباتات القادرة على تحمُّل المعادن بشكل سيئ؛ ومن ثَمَّ توجد هذه النباتات في مناطق المناجم فقط أو بالقرب منها للغاية، ويوجد تحوُّل حاد إلى النباتات غير القادرة على تحمُّل المعادن عند حدود هذه المناطق.

وفي حالات أقل تطرُّفًا، تنشأ تغيراتٌ جغرافية تدريجية في السمات؛ لأن الهجرة تطمس الاختلافات التي سبَّبها الانتخابُ المتباين جغرافيًّا، وذلك استجابةً للتغيرات في

ظروف البيئة؛ فالعديدُ من أنواع الثدييات التي تعيش في المنطقة المعتدلة الحرارة في نصف الكرة الشمالي، لها أحجامُ أجسادٍ أكبر في الشمال، ويتغيَّر متوسطُ حجم الجسم بشكل شبه متواصل من الشمال إلى الجنوب، وهو ما يعكس على الأرجح الانتخابَ المؤيِّد لصِغَر نسبة مساحة السطح إلى الحجم في المناخات الأبرد؛ حيث يُعَدُّ فقدان الحرارة مشكلةً. أيضًا تميل التجمعات التي تعيش في الشمال إلى امتلاك آذان وأطراف أقصر من مثيلاتها لدى التجمعات التي تعيش في الجنوب، وذلك لأسباب مشابهة.

إن الاختلافات بين التجمعات المنفصلة جغرافيًّا من النوع ذاته لا تتطلَّب بالضرورة وجودَ أنواع مختلفة من الانتخاب؛ فالانتخاب الواحد يمكن أن يؤدِّي أحيانًا إلى استجابات مختلفة؛ على سبيل المثال، وكما ذكرنا في الفصل الخامس: التجمعات البشرية في المناطق المعرَّضة لعدوى الملاريا بها طفراتٌ وراثية متباينة توفِّر مقاوَمةً ضد الملاريا. هناك مسارات جزيئية مختلفة تفضي إلى المقاومة، والطفراتُ المختلفة التي يمكن أن تسبِّب المقاوَمةَ ستحدث بفعل المصادفة في أماكن مختلفة، وفي المعتاد تكون مسألةُ هيمَنةِ طفرةٍ بعينها داخلَ تجمع بعينه أمرًا خاضعًا للمصادفة. يمكن أيضًا للاختلافات بين التجمعات الخاصة بالنوع ذاته أن تتطوَّر أيضًا حتى لو لم يوجد انتخاب على الإطلاق، وذلك نتيجة عملية الانحراف الوراثي العشوائية المذكورة سابقًا؛ ففي العديد من الأنواع، توجد عادةً اختلافاتٌ وراثية مميزة بين التجمعات المختلفة، حتى في نُسَخِ تتابعات الدي إن إيه أو التتابعات البروتينية المختلفة التي ليس لها تأثيرٌ على السمات المرئية، وليست التجمعات البشرية باستثناءٍ لهذا الأمر. وحتى داخل بريطانيا، توجد اختلافات في نِسَب الأفراد الذين يحملون فصيلة الدم A أو B أو O، وهي تتحدَّد من خلال الأشكال المتباينة لجين منفرد؛ على سبيل المثال: فصيلةُ الدم O أكثر شيوعًا في شمال ويلز واسكتلندا ممَّا هي عليه في جنوب إنجلترا. وفي بعض أجزاء من الهند تبلغ نسبة فصيلة الدم B أكثر من ٣٠ بالمائة، بينما تكون منعدمةَ الوجود تقريبًا بين السكان الأصليين للأمريكتين.

توجد أمثلة أخرى عديدة للتنوع الجغرافي، وبالرغم من الاختلافات المرئية بين الأعراق البشرية الرئيسية، فإنه لا توجد لدى البشر حواجز تَحُول دون التزاوُجِ بين التجمعات السكانية أو المجموعات العِرقية المختلفة، لكنْ في بعض الأنواع تبدو التجمعاتُ الواقعة على طرفَي أيِّ نوعٍ مختلفةً بدرجة كبيرة تكفي لأن يتم اعتبارها أنواعًا مختلفة، لولا حقيقة أنها مرتبطة بواسطة مجموعة من التجمعات الوسيطة التي تتزاوج فيما بينها. بل إن هناك حالات حدث فيها أنْ تشعَّب تجمعان يقعان على أقصى طرفَيْ نوعٍ

واحد تشعُّبًا كبيرًا، لدرجة أنهما باتَا عاجزَيْن عن التزاوج فيما بينهما، وإذا حدث أن انقرضت التجمعات الوسيطة، فسيُعَدُّ هذان التجمعان نوعين مختلفين.

وهذا يوضح نقطةً مهمة، وهي أنه وفق نظرية التطور، لا بد من وجود مراحل وسيطة في عملية الانعزال التكاثري؛ ومن ثَمَّ يجدر بنا ملاحظة ولو بعض الحالات التي فيها يكون من الصعب القول بما إذا كان تجمعان من التجمعات المرتبطة ينتميان إلى النوع نفسه أم إلى نوعين مختلفين. وبالرغم من أن هذا سيكون أمرًا غير ملائم لو أننا كنَّا نريد وضْعَ تصنيفات واضحة قاطعة، فإنه يُعَدُّ نتيجةً متوقَّعةً لعملية التطور، وهو أمر موجود بجَلاء في العالم الطبيعي؛ فهناك أمثلة عديدة معروفة للمراحل الوسيطة في عملية تطوُّر العَجْزِ التام عن التزاوج بين التجمعات المنفصلة جغرافيًّا. ومن الأمثلة التي خضعَتْ لدراسة جيدةٍ الأنواعُ الأمريكية من ذبابة الفاكهة «دروسوفيلا سيدو أوبسكيورا»؛ يعيش هذا النوع على الساحل الغربي لأمريكا الشمالية والوسطى، ويمتد على نحو شبه متصل من كندا إلى جواتيمالا، لكنَّ هناك تجمُّعًا منعزلًا منه موجودًا بالقرب من بوجوتا في كولومبيا؛ يبدو الذباب المنتمي إلى تجمُّع بوجوتا مطابِقًا لذباب التجمعات الأخرى من النوع، لكن تتابعات الدي إن إيه الخاصة به تختلف على نحوٍ طفيف عنه. وبما أن مراكمة اختلافات التتابعات تتطلَّب وقتًا طويلًا، فمن المرجح أن تجمع بوجوتا قد تأسَّسَ بواسطة بضع ذبابات مهاجرة منذ نحو ٢٠٠ ألف عام مضت. في المختبر، يتزاوج ذبابُ تجمُّعِ بوجوتا مع ذباب التجمعات الأخرى، ويتَّسِم الجيلُ الأول من النسل الهجين بالخصوبة الكاملة، بَيْدَ أن الذكور الهجينة التي لا تكون أمهاتها من تجمُّع بوجوتا تكون عقيمةً، ولا يُرصَد أيُّ عقمٍ لدى الذباب الهجين الناتج عن تزاوج أفراد تجمعات أخرى في بقية نطاق النوع. وإذا حدث أن استُقدِم ذبابٌ من التجمع الرئيسي إلى تجمُّع بوجوتا، فمن المفترض أن يتزاوج دون مشكلات مع ذباب بوجوتا، وبما أن الإناث الهجينة تتَّسِم بالخصوبة، يمكن أن يستمر التزاوُجُ بين أفراد التجمُّعَيْن في كل جيل. إذن، يدين تجمُّعُ بوجوتا بتميُّزِه إلى الانعزال الجغرافي، ومن ثَمَّ لا يوجد سببٌ قاهر يجعلنا نعتبره نوعًا منفصلًا، بالرغم من أنه بدأ في تطوير انعزال تكاثري، وهو ما يشير إليه العقمُ الذي يصيب ذكورَه.

من السهل نسبيًّا أن نتفهَّمَ سببَ تشعُّب تجمعات النوع نفسه التي تعيش في أماكن مختلفة من حيث السمات التي تجعلها تتكيَّف مع الاختلافات في بيئتها، كما في مثال شرشوريات جالاباجوس؛ لكن ما ليس واضحًا بالدرجة عينها هو السبب المؤدِّي إلى هذا

الفشل في التزاوج. أحيانًا قد يكون هذا نتاجًا جانبيًّا مباشِرًا إلى حدٍّ ما لعملية التكيف مع البيئات المختلفة؛ على سبيل المثال: ينمو نوعان من زهرة أوركيد القرد، وهما «ميمولوس لويسي» و«ميمولوس كارديناليس»، في جبال جنوب غرب الولايات المتحدة، وكما هو شأن أغلب أزهار أوركيد القرد فإن النوع «ميمولوس لويسي» يلقِّحه النحلُ، وتُظهِر أزهارُه العديدَ من أوجه التكيُّف مع عملية التلقيح بواسطة النحل (انظر الجدول)؛ لكنْ على غير المعتاد بالنسبة إلى أزهار أوركيد القرد نجد أن النوع «ميمولوس كارديناليس» يلقِّحه طائرُ الطنان، وتختلف أزهارُه في سمات عديدة تعزِّز عمليةَ التلقيح بواسطة الطنان؛ وهكذا فإن النوع «ميمولوس كارديناليس» قد تطوَّرَ على الأرجح من سلفٍ كان يتمُّ تلقيحُه بواسطة النحل، ذي شكل مشابِه لشكل النوع «ميمولوس لويسي»، عن طريق عملية تغيير هذه السمات الخاصة بالأزهار.

السمات الخاصة بأزهار نوعين من أوركيد القرد.

| النوع | ميمولوس لويسي | ميمولوس كارديناليس |
|---|---|---|
| المُلقِّح | النحل | الطائر الطنان |
| حجم الزهرة | صغير | كبير |
| شكل الزهرة | عريض، مزود بـ «منصة هبوط» | ضيق، أنبوبي |
| لون الزهرة | وردي | أحمر |
| الرحيق | معتدل، عالي السكر | وفير، منخفض السكر |

يمكن تهجين هذين النوعين من زهرة أوركيد القرد في المختبر، ويتسم النسل الهجين الناتج بالصحة والخصوبة، لكن في الطبيعة ينمو النوعان جنبًا إلى جنب دون تمازج. وتُظهِر الملاحظاتُ الخاصة بسلوك الملقحين في البرية، أن النحل الذي يزور النوعَ «ميمولوس لويسي» نادرًا ما يزور بعده النوعَ «ميمولوس كارديناليس»، وأن الطنان الذي يزور النوعَ «ميمولوس كارديناليس» نادرًا ما يزور بعد ذلك النوعَ «ميمولوس لويسي». ولمعرفة رد فعل الملقِّح حيالَ النباتات ذات السمات الزهرية الوسيطة، أُخِذ تجمُّعٌ من جيل ثانٍ هجينٍ مُنتَج في المختبر وزُرِع في البرية؛ كانت السمةُ الأقوى التي

تعزِّز الانعزالَ هي لون الزهرة؛ إذ كان اللون الأحمر يردع النحلَ ويجتذب طيورَ الطنان. وقد أثَّرَتْ سمات أخرى على أحد الملقِّحَيْن أو كليهما؛ فحجم الرحيق الوفير في كل زهرة كان يزيد زياراتِ الطنان، بينما الزهرة ذات البتلات الأكبر كانت تتلقَّى زياراتٍ أكثر من جانب النحل، وامتلكَتِ الأشكالُ المتوسطة بين النوعين احتماليةً متوسطةً للتعرُّض للتلقيح من جانب النحل مقارَنةً بالطنان، ومن ثَمَّ اتَّسَمَتْ بدرجات متوسطة من الانعزال عن النوعين الأصليين. في هذا المثال، أدَّتِ التغيرات التي حفَّزَها الانتخابُ الطبيعي مع تطور التلقيح بواسطة الطنان إلى جعْلِ تجمُّع «ميمولوس كارديناليس» أكثر انعزالًا من الناحية التكاثرية عن التجمُّع «ميمولوس لويسي» القريب منه للغاية.

وبالرغم من أننا لا نعرف في أغلب الحالات القوةَ التي حرَّكَتِ التشعُّبَ بين الأنواع القريبة للغاية بعضها من بعض، وأدَّتْ إلى انعزالها التكاثري، فإن أصل الانعزال التكاثري بين أي زوج من التجمعات المنفصلة جغرافيًّا ليس بمفاجأة في حد ذاته، لو كانت هناك تغيراتٌ تطورية مستقلة في التجمعين؛ فكل تغيُّرٍ في التركيب الوراثي لأحد التجمعين يجب إما أن يُحابيه الانتخابُ الطبيعي في هذا التجمع، وإما أن يكون له تأثيرٌ طفيف على الصلاحية بحيث يمكنه الانتشار عن طريق الانحراف الوراثي (الذي ناقشناه في الفصل الثاني، وسنناقشه في نهاية هذا الفصل). وإذا انتشر شكل مختلف داخل تجمع ما لأن له مزية تجعل التجمع يتكيَّف مع بيئته المحلية، فإن انتشاره لن تُعيقه أية تأثيرات مُضِرة حين يمتزج (في الأفراد الهجينة) بجينات من تجمُّعٍ مختلف لم يحدث له أن قابَلَه بصورة طبيعية. لا يوجد انتخاب للحفاظ على توافُق سلوك التزاوج بين الأفراد القادمين من تجمعات منفصلة جغرافيًّا أو إيكولوجيًّا، أو الحفاظِ على التفاعلات المتجانسة التي تسمح بالنمو الطبيعي، بين الجينات التي صارت مختلفةً في التجمعات المختلفة. وكما هو شأن السمات الأخرى التي لا يحافظ الانتخابُ عليها (مثل أعين الحيوانات التي تقطن الكهوف)، فإن القدرة على التزاوج بين الأنواع تتدهور مع مرور الوقت.

وفي ظل التشعُّب التطوري الكافي، يبدو الانعزال التكاثري الكامل أمرًا حتميًّا، وهذا الأمر ليس مفاجئًا أكثر من حقيقة أن القوابس الكهربائية ذات التصميم البريطاني غير متوافِقة مع المقابس الأوروبية، بالرغم من أن كل نوع من القوابس يعمل على نحو مثالي مع المقبس الخاص به. ففي الآلات التي صمَّمها البشر — التي يكون فيها التوافُقُ سمةً مرغوبًا فيها — يجب بذل جهود متواصِلة من أجل الحفاظ على هذا التوافُق، كما هو

الحال مثلًا في البرمجيات الخاصة بالحواسب الشخصية وحواسب ماكنتوش. وتُظهِر التحليلاتُ الوراثية للأفراد الناتجين عن تزاوج أنواع مختلفة، أن الأنواع المختلفة تحتوي بالفعل على مجموعات مختلفة من الجينات، تصير عاجزةً عن العمل حين يتمُّ الجمعُ بينها داخل الفرد الهجين. وكما ذكرنا من قبلُ، ذكور الجيل الأول الهجينةِ الآتيةِ من أنواعٍ مختلفة من الحيوانات تكون عقيمةً، بينما لا تكون الإناث كذلك؛ فيمكن حينها أن يحدث تزاوجٌ بين الإناث الهجينة الخصبة وبين أيٍّ من النوعين الأصليين. ومن خلال دراسة خصوبة نسل الذكور الناتج عن هذا التزاوج، يمكننا دراسة الأساس الوراثي لعقم الذكور الهجينة. هذا النوع من الدراسة أُجرِي على نحوٍ مكثَّف باستخدام ذبابة الفاكهة، وتبيِّن النتائجُ بوضوحٍ أن العقم الهجيني يَنتج بواسطة التفاعلات بين الجينات المختلفة الآتية من النوعين الأصليين. وفي حالة تجمعات البر الرئيسي وتجمعات بوجوتا الخاصة بذبابة «دروسوفيلا سيدو أوبسكيورا» — على سبيل المثال — فإن نحو ١٥ جينًا مختلفًا في كلا التجمعين يبدو أنها مشارِكةٌ في التسبُّب في عقم الذكور الهجينة.

إن الوقت المطلوب من أجْل إنتاج ما يكفي من الاختلافات بين زوج من التجمعات، بما يجعلهما عاجزَيْن عن التزاوج فيما بينهما، يتفاوت تفاوتًا كبيرًا؛ ففي مثال «دروسوفيلا سيدو أوبسكيورا»، تسبَّبَ مرورُ ٢٠٠ ألف عام (ما يزيد عن مليون جيل) في إنتاج انعزال غير مكتمل. وفي حالات أخرى، هناك أدلة على التطور السريع للغاية للحواجز بين التزاوج المختلط، كما في حالة أحد أنواع عائلة السمك البلطي في بحيرة فيكتوريا؛ هنا، انحدر ما يزيد عن ٥٠٠ نوع فيما يبدو من نوع واحد هو سلفها، ومع ذلك تُبيِّن الأدلة الجغرافية أن البحيرة موجودة منذ ١٤٦٠٠ عام فقط. يبدو أن الانعزال بين هذه الأنواع حدث في الأساس بسبب سمات سلوكية واختلافات لونية، وأن هناك اختلافاتٍ قليلةً للغاية بين الأنواع من حيث تتابُعات الدي إن إيه، ويبدو أن كل نوع جديد من هذه المجموعة استغرق نحو ألف عام في المتوسط كي يَظهَر، لكن مجموعات أخرى من الأسماك في البحيرة ذاتها لم تُطوِّر أنواعًا جديدة بمثل هذا المعدل المرتفع، ففي المعتاد يبدو أن تكوُّنَ نوعٍ جديد يحتاج عدة عشرات الآلاف من الأعوام كي يحدث.

بمجرد أن يصير تجمُّعان تجمعهما علاقة قرابة منعزلين تمامًا أحدهما عن الآخر بفعلِ واحدٍ أو أكثر من حواجز التزاوج المختلط، يصبح المصير التطوري لكلٍّ منهما مستقلًّا تمامًا عن الآخر، وسيميلان إلى التشعُّب أحدهما عن الآخر مع الوقت. أحد

الأسباب المهمة لهذا التشعُّب هو الانتخاب الطبيعي، فالأنواع التي تجمعها علاقةُ قرابةٍ وثيقة تتباين عادةً في العديد من السمات البِنَوية والسلوكية التي تُمكِّنها من التكيُّف مع سُبُل حياتها المختلفة، كما ذكرنا من قبلُ في حالة شرشوريات جالاباجوس. لكن في بعض الأحيان تكون الاختلافات الواضحة قليلةٌ للغاية بين الأنواع المتقاربة. هذا هو الحال عادةً مع الحشرات، فنوعَا ذبابة الفاكهة «دروسوفيلا سيمولانز» و«دروسوفيلا ماوريتيانا» يمتلك كلٌّ منهما بنيةً جسمانية مشابِهة للغاية للآخَر، ويتباينان فقط خارجيًّا من حيث بنية الأعضاء الجنسية للذكر؛ ومع هذا فهما نوعان منفصلان ويعزف كلٌّ نوع منهما بشدة عن التزاوج مع الآخَر. وعلى نحو مشابه، اكتُشِف حديثًا أن الخفاش الأوروبي الصغير منقسم إلى نوعين مختلفين؛ لا يتزاوج هذان النوعان في الطبيعة، وهما يختلفان من حيث نداءات التزاوج مثلما يختلفان في تتابعات الدي إن إيه. وعلى العكس، كما وصفنا للتو، توجد أمثلة عديدة لاختلافات ملحوظة بين تجمعات للنوع ذاته، لكن دون أن توجد حواجزُ تمنع التزاوجَ المختلط.

تبيِّن هذه الأمثلة أنه لا توجد علاقة مطلقة بين الاختلافات في السمات السهلة الرصد وقوة الانعزال التكاثري بين أي تجمُّعَيْن. أيضًا مدى الاختلافات بين أي نوعين أحدهما قريب الصلة بالآخَر، ليس مرتبطًا بالوقت المنقضي منذ أن صارا منعزلين تكاثُريًّا؛ وهذا يتضح من خلال الاختلافات الصارخة بين الأنواع الموجودة على الجزر مثل شرشوريات جالاباجوس، التي تطوَّرَتْ عبر نطاق زمني قصير مقارَنةً بالزمن الذي يفصل أنواعَ الطيور القريبة لها في أمريكا الجنوبية، التي يتبايَنُ الكثيرُ منها بدرجة أقل بكثير (انظر شكل ٤-٥، الفصل الرابع). بالمثل، توجد في السجل الحفري أمثلة عديدة على سلالات تُظهِر قدْرًا طفيفًا من التغيُّر عبر آلاف أو ملايين السنين، أو لا تُظهِره مطلقًا، يتبعها انتقالٌ مباغِت إلى أشكال جديدة، يعتبرها علماءُ الحفريات عادةً أنواعًا جديدة.

تُظهِر النماذج النظرية، علاوةً على التجارب المعملية، أن الانتخاب القوي يمكن أن يُنتِج تغيراتٍ عميقةً في أي سمة عبر ١٠٠ جيل أو أقل (الفصل الخامس)؛ على سبيل المثال: انتُخِب تجمُّعٌ من ذبابة الفاكهة «دروسوفيلا ميلانوجاستر» صناعيًّا بهدف زيادة عدد الشعيرات الموجودة في بطون الذباب، وقد أنتَجَ التطورُ زيادةً مقدارها ثلاثة أضعاف في متوسط عدد الشعيرات على امتداد ٨٠ جيلًا، وهذا هو تقريبًا نفس معدل الزيادة في متوسط حجم الجمجمة بين أسلافنا الأوائل الشبيهة بالقرود وبيننا، وهو ما استغرق نحو ٤ ملايين عام (نحو ٢٠٠ ألف جيل). وعلى العكس، لن تتغيَّر السمات بشكل كبير

ما إن يأخذ النوع الذي يعيش في بيئة مستقرة الوقتَ الكافي للتكيُّف معها؛ فمن المستحيل عادةً أن نعرف من السجل الحفري ما إذا كان أيُّ تغيُّرٍ تطوري «مفاجئ» مرصودٍ يعني ضمنًا بدايةَ نوعٍ جديد (لا يستطيع التزاوُجَ مع النوع الذي انحدر منه)، أم أنه ينطوي على سلالة واحدة، تتطوَّر استجابةً إلى التغيرات البيئية. في كلتا الحالتين، لا يوجد لغزٌ يكتنف التغيرَ الجيولوجي السريع.

وأخيرًا، ما الذي تعنيه الأنواعُ حين يكون هناك تكاثر لا جنسي، يحدث في العديد من الكائنات الوحيدة الخلية كالبكتيريا؟ في هذه الحالة يكون معيارُ التزاوج المختلط عديمَ المعنى. ولأغراض التوضيح في هذه الحالات يستخدِم علماءُ الأحياء ببساطة معاييرَ اعتباطيةً قائمة على التشابه، مبنيةً إما على سمات لها أهمية عملية (مثل تركيب الجدران الخلوية البكتيرية)، وإما على الاعتماد — على نحو متزايد — على تتابُعات الدي إن إيه. والأفراد المتشابهة بدرجة كافية، التي تشترك معًا في السمات المستخدَمة في التصنيف، تُصنَّف معًا كنوع واحد، بينما المجموعات الأخرى من الأفراد التي تشكِّل تجمُّعًا مختلفًا تُصنَّف بوصفها نوعًا مختلفًا.

## التطوُّر الجزيئي وتشعُّب الأنواع

في ضوء العلاقة المضطربة بين الزمن المنقضي منذ انفصال أي نوعين وبين تشعُّبهما من حيث سمات الشكل، يستخدم علماءُ الأحياء على نحو متزايد المعلوماتِ الآتيةَ من تتابعات الدي إن إيه للأنواع المختلفة في عمل استنتاجات بشأن العلاقات بين هذه الأنواع.

وعلى نحو شبيه بالمقارنات الخاصة بهجاء الكلمة ذاتها في اللغات المختلفة التي تجمعها علاقةُ قرابةٍ، يمكننا أن نرى أوجهَ شبهٍ بالإضافة إلى أوجه الاختلاف في تتابعات الجينات عينها لدى الأنواع المختلفة؛ على سبيل المثال: كلمة house في اللغة الإنجليزية وكلمة haus في الألمانية، وكلمة huis في الهولندية، وكلمة hus في الدنماركية؛ كلها تحمل المعنى ذاته (منزل)، وهي تُنطَق في هذه اللغات كلها بصورة متشابهة. هناك نوعان من الاختلافات بين هذه الكلمات؛ أولهما أن هناك تغييرًا في الحروف في موضع معين، كما حدث عندما تغيَّر الحرف الثاني في الكلمة من o في الإنجليزية إلى a في الألمانية. ثاني نوع من الاختلافات هو إضافة وحذف الحروف، فالحرف e في نهاية الكلمة الإنجليزية

حُذِف في بقية اللغات، وحُذِف الحرفُ a من الموضع الثاني في الكلمة الدنماركية مقارَنةً بالألمانية. دون مزيدٍ من المعلومات عن العلاقات التاريخية بين اللغات، من الصعب التأكد من اتجاه هذه التغيرات، بالرغم من أن حقيقة تفرُّد الإنجليزية بالحرف e في نهاية الكلمة توحي بقوة بأن هذه إضافة متأخِّرة، وحقيقة أن hus هي النسخة الأقصر توحي بأن ثمة حرفَ علةٍ قد فُقِد في الكلمة الدنماركية. ومع إجراء مثل هذه المقارنات بين عينة كبيرة من الكلمات، يمكن استخدام الاختلافات الموجودة بين اللغات المختلفة في قياس العلاقات بينها، وترتبط الاختلافاتُ بشكل طيب مع الزمن الذي أخذت اللغاتُ تتشعَّب فيه. تفصل مائتا عام فقط بين اللغة الإنجليزية الأمريكية والإنجليزية البريطانية، لكن الأولى تباعَدَتْ عن الثانية بشكل ملحوظ، بما في ذلك تطوُّرُ نُسَخٍ محلية مختلفة من اللغة. اللغتان الألمانية والهولندية أكثر تباعُدًا إحداهما عن الأخرى، بينما اللغتان الفرنسية والإيطالية أكثر تباعُدًا بكثيرٍ إحداهما عن الأخرى.

يمكن استخدام المبدأ عينه في حالة تتابعات الدي إن إيه؛ في هذه الحالة، التغيراتُ الناتجة عن إدخال وحذف الأحرف المنفردة في الدي إن إيه تكون نادرةً في أجزاء الجينات التي تشفِّر البروتينات؛ نظرًا لأن هذه التغيرات سيكون لها دائمًا تأثيرات كبيرة على تتابُع الأحماض الأمينية الموجودة في البروتين، ومن شأنها أن تجعلها غير عاملة. بين الأنواع القريبة الصلة بعضها ببعض، أغلب التغيرات في التتابعات المشفِّرة من الجينات يتضمَّن تغيراتٍ منفردةً في أحرف منفردة لتتابع الدي إن إيه، مثل تغيير الحرف G إلى A. يعرض الشكل رقم ٣-٨ مثالًا لهذا؛ إذ يوضِّح تتابعاتٍ لأجزاء من جين مستقبِل الهرمون المنشط للخلية الميلانية لدى البشر والشمبانزي والكلاب والفئران والخنازير.

عن طريق مقارَنةِ أعداد الحروف في الدي إن إيه التي يختلف فيها تتابُعُ الجين عينه بين زوج من الكائنات، يمكن قياس مستوى التباعد كميًّا بشكل دقيق، وهو الأمر الذي يصعب عمله عن طريق أوجه الشبه والاختلاف في الشكل. وبمعرفة الشفرة الوراثية، يمكننا أن نرى أيٌّ من الاختلافات يُغيِّر التتابُعَ البروتيني المتوافِق مع الجين المعنِيِّ (تغيرات «الإحلال»)، وأيها لا يُغيِّره (التغيرات «الصامتة»)؛ على سبيل المثال: في تتابعات مستقبِل الهرمون المنشط للخلية الميلانية، يمكن لعملية عدٍّ بسيطة للاختلافات بين تتابعات البشر والشمبانزي في الشكل رقم ٣-٨ أن تكشف عن أربعة اختلافات في أحرف الدي إن إيه المائة والعشرين المبيَّنة هنا. وبالنسبة إلى التتابعات الكاملة للأنواع

المختلفة (حذف منطقة صغيرة مع بعض عمليات الإضافة والحذف لأحرف الدي إن إيه)، فإن عدد الاختلافات عن التتابُع البشري موضَّح في الجدول التالي:

| الإنسان في مقابل | الحمض الأميني نفسه (اختلافات صامتة) | حمض أميني مختلف |
|---|---|---|
| الشمبانزي | ١٧ | ٩ |
| الكلب | ١٣٤ | ٥٣ |
| الفأر | ١٦٩ | ٦٣ |
| الخنزير | ١٠٧ | ٥٦ |

وقد أوضحت دراسة حديثة أن تشعُّب التتابع بالنسبة إلى ثلاثة وخمسين من تتابعاتِ الدي إن إيه غيرِ المشفِّرة التي جَرَتْ مقارنتها بين الإنسان والشمبانزي؛ تراوَحَ بين ٠ و٢,٦ بالمائة من إجمالي عدد الحروف، بمتوسطٍ قدرُه ١,٢٤ بالمائة (١,٦٢ بالمائة في حالة الإنسان والغوريلا). هذه التقديرات تبيِّن لماذا يُعَدُّ الآن مقبولًا أن الشمبانزي، وليس الغوريلا، هو أقرب الكائنات الحية إلينا. تصير الاختلافات أكبر بكثير عند مقارنة الإنسان بالأورانج أوتان، وأكبر من ذلك عند مقارنته بالسعادين. الثدييات الأبعد من ذلك، مثل اللواحم والقوارض، تختلف على مستوى التتابعات بدرجة أكبر بكثيرٍ من اختلاف الرئيسيات المتنوعة؛ والثدييات تختلف عن الطيور بدرجة أكبر بكثير من اختلاف بعضها عن بعض، وهكذا دواليك. إن أنماط العلاقات التي تكشف عنها مقارناتُ التتابعات تتفق إجمالًا مع ما هو متوقَّع من الأزمنة التي شهدت ظهورَ مجموعات الحيوانات والنباتات الكبرى في السجل الحفري، وهو الأمر المتوقَّع وفق نظرية التطوُّر.

يُظهِر جدول اختلافات التتابعات أن التغيرات الصامتة تكون أكثر شيوعًا في المعتاد من تغيرات الإحلال، حتى بالرغم من أن التغيرات الصامتة تكون نادرةً بين الأنواع الأكثر قربًا بعضها من بعض، مثل الشمبانزي والإنسان. والتفسير البديهي لذلك هو أن غالبية التغيرات في تتابعات الأحماض الأمينية الخاصة بأحد البروتينات تُعِيقه عن أداء وظيفته بشكل ما. وكما أوضحنا في الفصل الخامس، فإن من شأن تأثير ضار صغير تسبِّبه طفرةٌ ما أن يؤدِّي إلى تخلُّص الانتخابِ الطبيعي بسرعةٍ من هذه الطفرة داخل التجمع؛

ومن ثَمَّ فإن أغلب الطفرات التي تغير التتابعات البروتينية لا تسهم مطلقًا في الاختلافات التطورية في تتابعات الجينات التي تتراكم بين الأنواع. بَيْدَ أن هناك أيضًا أدلةً متزايدةَ القوةِ على أن تطوُّرَ تتابعات بعض الأحماض الأمينية مدفوعٌ من جانب الانتخاب الذي يؤثِّر على الطفرات الملائمة أحيانًا، بحيث يحدث تكيُّفٌ جزيئي (انظر الفصل الخامس).

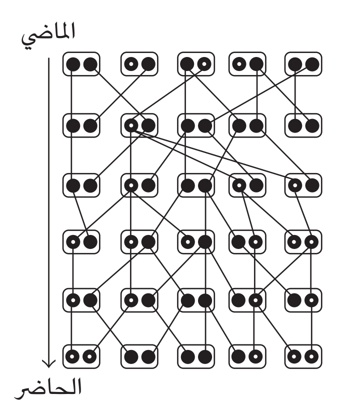
على النقيض من التأثيرات الضارة عادةً للطفرات التي تغيِّر الأحماضَ الأمينية، فإن التغيرات الصامتة في تتابعات الجينات لم يكن لها سوى تأثير طفيف على الوظائف البيولوجية، هذا إن كان لها تأثير على الإطلاق؛ ومن ثَمَّ فمن المنطقي أن يكون السوادُ الأعظم من التشعُّب في التتابعات الجينية بين الأنواع هو تغيراتٍ صامتةً. لكن حين تظهر طفرةٌ جديدة صامتة في أي تجمُّع، فإنها تكون مجرد نسخة وحيدة بين آلاف أو ملايين نُسَخ الجين المعنيِّ (إذ يحمل كلٌّ فرد من أفراد التجمع جينين). كيف يمكن لمثل هذه الطفرة أن تنتشر بين أفراد التجمع لو أنها لا تقدِّم أيَّ مزيةٍ انتخابية لحاملها؟ الإجابة هي أن التغيرات العشوائية في معدلات النُّسَخ البديلة (الانحراف الوراثي) تحدث في مجتمعات محدودة، وهو المفهوم الذي ناقَشْناه باختصار في الفصل الثاني.

تسير هذه العملية كما يلي: لنفترِضْ أننا ندْرُس تجمُّعًا من ذبابة الفاكهة «دروسوفيلا ميلانوجاستر»؛ وكي يظل التجمع باقيًا، على كل فرد بالغ أن يسهم في المتوسط بفردين من نسله في الجيل التالي. وَلْنفترِضْ أن التجمُّعَ يتباين من حيث لون العين، بحيث يحمل بعض أفراده جينًا طافرًا يجعل لونَ العين أحمرَ زاهيًا، بينما تتسبَّب النسخةُ غير الطافرة من هذا الجين في جعل أعين كل الذباب الآخَر ذات لون أحمر باهت على النحو المعتاد. إذا حظي الأفراد الحاملون لأيٍّ من النسختين بالعدد نفسه في المتوسط من النسل، فلن يحدث ضغط انتخابي على لون العين. ويُقال إن هذه الطفرة «محايدة» في تأثيرها، وبسبب هذه الحيادية فيما يخصُّ الانتخاب، ستُختار جيناتُ الجيل التالي عشوائيًّا من التجمع الأبوي (شكل ٦-١). قد لا يكون لبعض الأفراد أي نَسْل، بينما قد يتصادف أن يكون للبعض الآخَر نسلٌ يتجاوز المعدل المتوسط المتمثِّل في فردين؛ يعني هذا أن معدل الجين الطافر في جيل النسل لن يكون مماثِلًا لمعدله لدى الآباء؛ لأنه من غير المرجح بشدة أن يسهم الأفراد الحاملون للجين الطافر وغير الحاملين له بنفس عدد النسل بالضبط؛ ومن ثَمَّ ستكون هناك على مر الأجيال تفاوتاتٌ مستمرة في تركيبة التجمع، إلى أن يمتلك كلُّ أفراد التجمع، عاجلًا أم آجلًا، الجينَ الخاص بالعيون الحمراء الزاهية، أو تغيب تمامًا هذه الطفرة من التجمع ويمتلك أفراده جميعًا النسخة البديلة

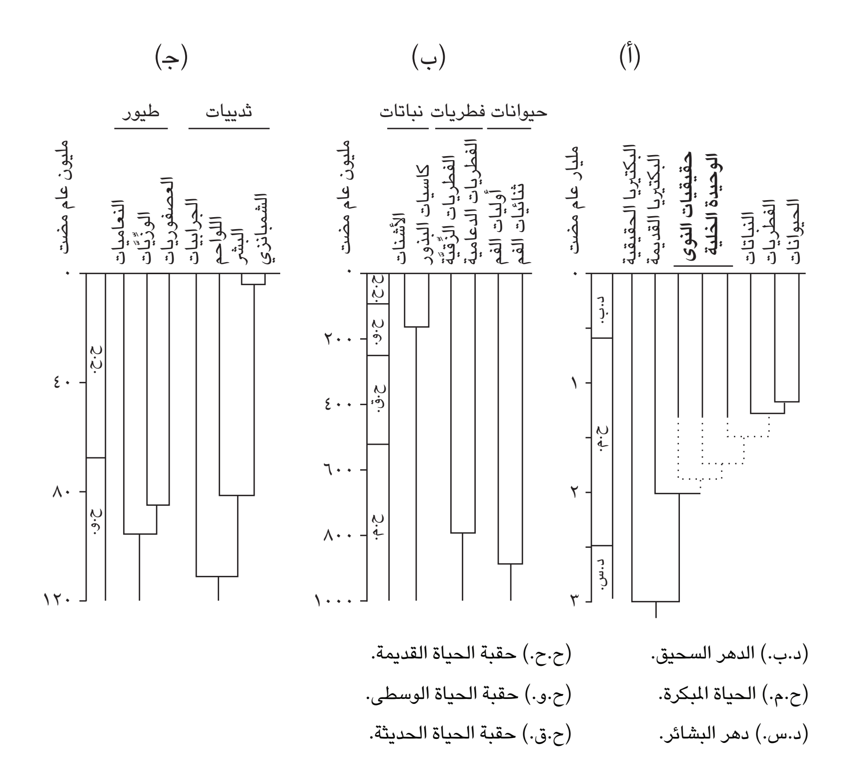
من الجين. في أي تجمُّعٍ صغيرِ العدد يكون الانحراف سريعًا، ولن يمر وقت طويل إلى أن يصير كل أفراد التجمع متماثلين، لكن في التجمعات الكبيرة العدد يستغرق الأمر وقتًا أطول.

وهذا يوضِّح تأثيرين من تأثيرات الانحراف الوراثي؛ التأثير الأول هو أنه بالرغم من أن أي نسخة بديلة تنحرف إما إلى المحو التام وإما إلى معدلٍ قدرُه ١٠٠ بالمائة (ترسيخ)، فإن السمة التي يؤثِّر عليها الجينُ تتفاوت داخل التجمع؛ فاستحداث نُسَخ مختلفة جديدة بفعل الطفرة والتغيرات في معدلات وجود النُّسَخ البديلة (وكذلك، من وقت لآخَر، فقدان الجينات المختلفة) بفعل الانحراف، يحدِّد مدى التنوع داخل التجمع. وتكشف دراسةُ تتابعاتِ الدي إن إيه للجينات نفسها في أفراد مختلفين داخل التجمُّع عن تبايُن المواقع الصامتة بسبب هذه العملية، كما ذكرنا في الفصل الخامس.

التأثير الثاني للانحراف الوراثي هو أن أي نسخة مختلفة محايدة انتخابيًّا كانت في البداية نادرةً للغاية، تكون لها فرصةٌ للانتشار بين أفراد التجمع كله والحلول محلَّ النُّسَخ البديلة، على الرغم من أن احتمالات أن تتعرَّض للمحوِ التام تكون كبيرةً؛ ومن ثَمَّ يؤدي الانحراف الوراثي إلى تشعُّبٍ تطوري بين التجمعات المنعزلة، حتى دون أن يعزِّزَ الانتخابُ هذه التغيرات. هذه العملية بطيئة للغاية، ويعتمد معدلُ حدوثها على المعدل الذي تنشأ به طفرات جديدة محايدة، علاوةً على المعدل الذي يؤدِّي به الانحرافُ الوراثي إلى إحلال إحدى نُسَخ الجين والاستعاضة عنها بنسخة جديدة. ومن الجدير بالذكر أنه يتبيَّن أن معدل تشعُّب تتابعات الدي إن إيه بين أي نوعين، إنما يعتمد فقط على معدل الطفرات لكل حرف من أحرف الدي إن إيه (أيِ المعدل الذي يصير به أيُّ حرفٍ بعينه لدى الأب طافرًا في النسخة المنقولة للنسل). ثمة تفسير بديهي لذلك يقضي بأنه في غياب أي تأثير للانتخاب، فلا شيء يؤثِّر على عدد الاختلافات الراجع حدوثها لطفرات بين أيِّ نوعين، فيما عدا المعدل الذي تظهر به الطفرات في التتابعات، ومقدار الوقت المنقضي منذ أنْ كان للنوعين سلفٌ مشترك. يكون لدى التجمع الكبيرِ المزيدُ من الطفرات الجديدة في كل جيل، وهو ما يرجع ببساطة إلى وجود المزيد من الأفراد الذين قد تحدث طفرات لهم. بَيْدَ أن الانحراف الوراثي يحدث بسرعة أكبر في التجمعات الصغيرة، كما شرحنا آنفًا. ويتبيَّن لنا أن التأثيرَيْن المتعاكسَيْن لحجم التجمع يلغي أحدهما الآخَر تمامًا؛ ومن ثَمَّ يحدِّد معدلُ الطفرات معدلَ التشعُّب.




شكل ٦-١: **الانحراف الوراثي**. يُظهِر الشكلُ عمليةَ الانحراف الوراثي لجين واحد عبر ستة أجيال، داخل تجمُّعٍ مقدارُه خمسة أفراد؛ كل فرد (يُرمَز إليه بمستطيل دائري الحواف) يملك نسختين من الجين، واحدة من كل والد من الوالدَيْن. تتابعات الدي إن إيه المختلفة الخاصة بنسختَي الجين الخاصتين بكل فرد ليسَتْ مبيَّنةً بالتفصيل، لكن يُرمَز إليها بالأقراص السوداء المصمتة والأقراص التي تحتوي على دوائر بيضاء. يمكن اعتبار أن الدوائر البيضاء تتوافق مع نسخة الجين التي تتسبَّب في لون العيون الأحمر الزاهي، والأقراص السوداء المصمتة تتوافق مع نسخة الجين التي تتسبَّب في لون العيون الأحمر الباهت، وذلك في المثال الخاص بذبابة الفاكهة الوارد في النص. في الجيل الأول، يملك ثلاثة أفرادٍ أحدَ الجينات ذات الدوائر البيضاء وأحدَ الجينات السوداء المصمتة؛ ومن ثَمَّ فإن ٣٠ بالمائة من الجينات داخل التجمع بها دوائر بيضاء. يُظهِر الشكل خطوطَ النسب الخاصة بالجينات الموجودة في كل جيل (نفترض هنا على سبيل التيسير أن أفرادها يمكنها أن تتكاثر إما كذكور وإما كإناث، كما هو الحال بالنسبة إلى العديد من الأنواع الخنثوية من النباتات، مثل الطماطم، وبعض الحيوانات، كديدان الأرض). يتصادف أن يكون لبعض أفرادها نسل أكثر عددًا من غيرها، بينما يكون لمجموعة أخرى نسلٌ أقل عددًا، أو قد لا يكون لها نسل على الإطلاق (على سبيل المثال: الفرد المبيَّن على يمين الجيل الثاني)؛ ومن ثَمَّ يتفاوت عددُ نُسَخ الجينات السوداء المصمتة وتلك المحتوية على دوائر بيضاء من جيل لآخر. وفي الجيل الثالث، يرث ثلاثة أفراد نسخةَ الجين ذات الدائرة البيضاء من الفرد الوحيد الذي يحمل هذا الجين في الجيل الثاني، وبذا تتغير نسبةُ هذا الجين من ١٠ بالمائة إلى ٣٠ بالمائة، وفي الجيل الذي يليه تصير ٥٠ بالمائة، وهكذا دواليك.




شكل ٦-٢: تقسيمٌ زمني حديث لشجرة الحياة مبنيٌّ على الاختلافات في تتابعات الدي إن إيه، مع تواريخ التشعُّب التقديرية بين المجموعات. القسم (أ) يبيِّن كلَّ الكائنات (البكتيريا الحقيقية والبكتيريا القديمة هما القسمان الرئيسيان للبكتيريا)، والقسم (ب) يبيِّن الكائنات العديدة الخلايا (كاسيات البذور هي نباتات مزهرة، والفطريات الزِّقيَّة والفطريات الدعامية نوعان رئيسيان من الفطريات)، والقسم (ج) يبيِّن مجموعاتِ الطيور والحيوانات (تضمُّ النعاميات طائرَ النعام وأقرباءه، وتضمُّ الوزيَّات كلَّ أنواع البط وأقربائه، وتضمُّ العصفوريات الطيورَ المغرِّدة).

هذه النتيجة النظرية لها تبعات مهمة بالنسبة إلى قدرتنا على تحديد العلاقات بين الأنواع المختلفة، وهي تعني ضمنًا أن التغيرات المحايدة تتراكم داخل أي جين مع مرور الوقت، بمعدلٍ يعتمد على معدل تطافُر الجين (مبدأ الساعة الجزيئية الذي

ذكرناه في الفصل الثالث دونَ أن نتعرَّض له بالشرح). ومن ثَمَّ فإن تغيرات التتابعات داخل الجينات من المرجح أن تحدث على نحوٍ أكثر انتظامًا أشبه بعمل الساعة، مقارَنةً بالتغيرات في السمات المعرضة للانتخاب؛ فمعدلات التغيرات في الشكل تعتمد بقوة على التغيرات البيئية، ومن الممكن أن يحدث التغير بمعدلات متفاوِتة، وأن يحدث انعكاس في اتجاه سير التغير.

حتى الساعة الجزيئية نفسها ليست دقيقة للغاية؛ فمعدلات التطور الجزيئي يمكنها أن تتفاوت مع الوقت داخلَ خط السلالة نفسه، كما تتفاوت بين خطوط السلالات المختلفة. ومع هذا، فإن استخدام الساعة الجزيئية يمكِّن علماءَ الأحياء من أن يؤرِّخوا بشكلٍ تقريبي عملياتِ التشعُّب بين الأنواع التي لا يوجد لها سجل حفري. ولضبط هذه الساعة، نحتاج إلى تتابعات من أقرب الأنواع المتاحة التي تكون تواريخُ تشعُّبِها معروفةً؛ أحد أهم التطبيقات لهذه الطريقة هو تأريخ زمن الانفصال بين السلالة التي نشأ منها الإنسان الحديث وتلك التي أدَّتْ إلى ظهور الشمبانزي والغوريلا، والتي لا يوجد لها سجل حفري متاح. وقد مكَّنَنا استخدامُ الساعة الجزيئية مع عدد كبير من التتابعات الجينية من تقدير الفترة الزمنية لهذا الانفصال بقدرٍ مقبولٍ من الثقة بنحو ٦ أو ٧ ملايين عام. ولأن معدل تطور التتابعات المحايدة يعتمد على معدل التطافر، فإن الساعة الجزيئية تكون بطيئةً للغاية؛ نظرًا لأن المعدلَ الذي يتغيَّر به حرف واحد من أحرف الدي إن إيه بفعل الطفرات بطيءٌ للغاية. وحقيقةُ أن نسبةً نحو ١ بالمائة من أحرف الدي إن إيه هي المختلفة فقط بين الإنسان والشمبانزي، تعني أن الحرف الواحد يتغير مرةً واحدة كلَّ فترة تزيد عن المليار عام؛ وهذا يتفق مع القياسات التجريبية الخاصة بمعدل التطافر.

وُجِد أيضًا أن الساعة الجزيئية تنطبق على تتابعات الأحماض الأمينية الخاصة بالبروتينات؛ فكما ذكرنا من قبلُ، تتطوَّر التتابعات البروتينية على نحو أبطأ ممَّا تفعل اختلافاتُ الدي إن إيه الصامتة، وهي من ثَمَّ مفيدةٌ في المهمة الصعبة المتمثِّلة في مقارَنةِ الأنواع التي تشعَّبَتْ منذ زمن بعيد للغاية؛ فبين هذه الأنواع، ستكون تغيراتٌ عديدة قد حدثت في بعض مناطق تتابعات الدي إن إيه، بحيث يصير من المستحيل أن نحسب بدقةٍ عددَ الطفرات التي حدثَتْ؛ ومن ثَمَّ فإن العلماءَ المهتمين بإعادة بناء أزمنة التشعُّب بين المجموعات الرئيسية للكائنات الحية، يستخدمون البياناتِ المأخوذةَ من الجزيئات المتطورة ببطء (شكل ٦-٢). بطبيعة الحال هذه التواريخ ما هي إلا تقديرات تقريبية،

بَيْدَ أن تراكُمَ التقديرات من العديد من الجينات المختلفة يمكن أن يحسِّن دقةَ العملية. إن الاستخدام الحصيف لمعلومات التتابعات الآتية من الجينات التي تطوَّرَتْ بمعدلات مختلفة، يمكِّن علماءَ الأحياء التطوريين من تكوين صورة للعلاقات بين مجموعات الكائنات التي كان آخِر سلف مشترك لها يعيش منذ مليار عام مضت أو نحو ذلك. بعبارة أخرى، إننا نقترب من إعادة بناء شجرة الحياة الخاصة بالأنساب.

الفصل السابع

# بعض المشكلات الصعبة

مع تزايد فهم علماء الأحياء لنظرية التطور بشكل جيد، واختبارهم لها، أُثِيرت أسئلة جديدة؛ فالمشكلات كلها لم تُحَل، ولا تزال أسئلة قديمة، وأخرى جديدة، تُثِير الكثيرَ من الجدل. في هذا الفصل سنصف بعضَ أمثلة الظواهر البيولوجية التي يبدو أن من الصعب تفسيرها؛ بعض هذه الظواهر تناوَلَها داروين نفسه، بينما خضع البعض الآخَر لأبحاث لاحقة.

## كيف يمكن لعمليات التكيُّف المعقَّدة أن تتطور؟

كثيرًا ما يُثِير منتقدو نظرية التطور عن طريق الانتخاب الطبيعي مسألَةَ صعوبةِ تطوُّرِ البنى البيولوجية المعقدة، بدايةً من جزيئات البروتينات، ومرورًا بالخلية المنفردة، وانتهاءً بالعين والمخ. كيف يمكن إنتاج جزء عامل بشكل مثالي ومتكيِّف على نحو أنيق من آلية بيولوجية فقط عن طريق الانتخاب القائم على الطفرات التي تقع بفعل المصادفة؟ إن فهم الكيفية التي يمكن أن يحدث بها هذا الأمر يكمن في معنًى آخَر تحمله كلمةُ «التكيُّف»؛ ففي تطور الكائنات وآلياتها المعقدة، تكون جوانب عديدة عبارة عن نُسَخ معدَّلة (متكيِّفة) من بنًى أخرى قائمة بالفعل، تمامًا مثلما يحدث حين تُصنَع الماكينات على يد مهندسين؛ فعند صناعة ماكيناتٍ وآلاتٍ معقَّدة، تُنقَّح النماذجُ الأولية غير المتقنة مع مرور الوقت وتتشكَّل (تتكيَّف) بحيث تصير لها استخداماتٌ جديدة غير متوقَّعة. ويُعَدُّ تطوُّر الإحلال الكامل للركبة مثالًا طيبًا على العملية التي يكون فيها الحلُّ الارتجالي الأولي لمشكلةٍ ما جيدًا بشكل كافٍ، لكنه يتكيَّف مع مرور الوقت كي يعمل بشكل أفضل وأفضل. وكما هو الحال في التطور البيولوجي، وُضِعت تصميماتٌ عديدة مبكرة تبدو

سيئةً بمعايير اليوم، لكن كل واحد منها كان تحسينًا لما سبقه، ويمكن استخدامه من طرف جرَّاحِي الركبة، وكل تصميم من هذه التصميمات لعب دوره بوصفه مرحلةً في تطوُّر الركبة الصناعية الحديثة المعقَّدة.

تشبه عمليةُ التكيُّف المتتابِع للتصميمات هذه عمليةَ تسلُّقِ أحد التلال في ضباب كثيف؛ فحتى دون وجود هدف يتمثَّل في الوصول إلى القمة (أو حتى دون معرفة مكان القمة)، إذا اتَّبَعَ المرءُ قاعدةً بسيطة — كل خطوة يصعد بها إلى الأعلى — فسوف يقترب أكثر وأكثر من قمة التل (أو على الأقل أقرب قمة إليه)؛ فمجرد جعْلِ بنيةٍ ما تعمل على نحوٍ أفضل بصورةٍ أو بأخرى سيؤدِّي في النهاية إلى تصميم مُحسَّن، دون أن يكون ضروريًّا وجودُ «مصمِّم». في الهندسة، يكون التصميمُ المُحسَّن عادةً نتيجةً للعديد من الإسهامات من مهندسين مختلفين على مدار عملية تطوُّر الماكينة، ولَكَمْ سيشعر مصنِّعو السيارات الأوائل بالذهول لو أنهم رأَوْا السيارات الحديثة. في التطوُّر الطبيعي، ينتج هذا عمَّا أُطلِق عليه عمليةُ «الإصلاح» البسيطة للكائن، بحيث يكون الكائنُ الذي يملك هذه التغيرات البسيطة أعلى قدرةً على البقاء أو التكاثُر مقارَنةً بسواه. وفي عملية تطوُّر البنى المعقَّدة، يجب بطبيعة الحال أن تتطوَّر سماتٌ عديدة على نحوٍ متزامِنٍ، بحيث تكون الأجزاءُ المختلفة للبنية متكيِّفةً على نحوٍ طيب مع عمل الجسم كله. ولقد رأينا في الفصل الخامس أن السمات المفيدة يمكن أن تنتشر بين أفرادِ أيِّ تجمُّعٍ في غضون فترةٍ بسيطة من الوقت، مقارَنةً بالوقت المتاح للتغيرات التطورية الكبرى، حتى لو كانت في البداية نادرةَ الوجود؛ ومن ثَمَّ يمكن لسلسلة من التغيرات البسيطة في بنيةٍ تعمل بالفعل، ويمكن تحسينها، أن تؤدِّي إلى إنتاج تغيُّرات تطورية كبيرة. وبعد آلاف عديدة من السنوات، لن يكون من الصعب تخيُّل حتى أكثر التغيرات جذريةً، وبعد مرور ما يكفي من الوقت، ستختلف البنية عن حالتها السابقة بطرق عديدة مختلفة، بحيث يملك أفرادُ التجمعِ الوليدِ مزيجًا من السمات لم يكن موجودًا من قبلُ قطُّ لدى سلفه، تمامًا مثلما تملك السياراتُ الحديثة اختلافاتٍ عديدةً مقارَنةً بالسيارات الأولى. ليست هذه إمكانية نظرية فحسب، فكما وصفنا في الفصل الخامس، فإن القائمين على استيلاد وتهجين الحيوانات والنباتات يحقِّقون هذا عن طريق الانتخاب الصناعي؛ ومن ثَمَّ لا توجد صعوبةٌ في رؤية الكيفية التي يمكن أن يسبِّب بها الانتخابُ الطبيعي تطوُّرَ سماتٍ معقَّدة للغاية، مؤلَّفة من عدد كبير من المكونات المعدَّلة على نحوٍ متبادل فيما بينها.

أحيانًا يُطرَح تطوُّرُ جزيئات البروتين بوصفه مشكلةً صعبة على نحو خاص؛ فالبروتينات بنًى معقدة يجب أن تتفاعل أجزاؤها معًا كي تعمل على نحو سليم (يجب أن يتفاعل العديد من البروتينات مع بروتينات وجزيئات أخرى، بما في ذلك الدي إن إيه في بعض الحالات)، ويجب أن تكون نظريةُ التطوُّر قادرةً على تفسير تطوُّر البروتينات. هناك ٢٠ نوعًا مختلفًا من الأحماض الأمينية، وبذا فإن احتماليةَ أن يَظهَر الحمض السليم في موقعٍ بعينه في جزيء بروتيني يبلغ طوله ١٠٠ حمض أميني (أقصر من العديد من البروتينات الحقيقية)، تبلغ ١ في العشرين؛ ومن ثَمَّ تصير فرصةُ تجميعِ مائة حمض أميني معًا على نحوٍ عشوائي — بحيث يكون كلُّ حمض أميني في الموضع الصحيح له داخل التتابُع؛ ومن ثَمَّ يتكوَّن بروتين عامل — فرصةً بعيدة للغاية؛ ولهذا السبب زُعِم أن احتماليةَ تجميع بروتين عامل مشابِهةٌ لاحتمالية تجميع طائرة بواسطة إعصارٍ ضرَبَ ساحةً للخردة. من الصحيح أن أي بروتين عامل لا يمكن تجميعه عن طريق الانتقاء العشوائي للأحماض الأمينية لكل موضع في التتابع، لكن كما أوضحنا في التفسير السابق، لا يعمل الانتخابُ الطبيعي بهذه الطريقة؛ فالبروتينات بدأت على الأرجح في سلاسل قصيرة بها بضعةُ أحماض أمينية يمكن أن تتسبَّب في إتمام التفاعلات على نحوٍ أسرع، ثم تحسَّنَتْ مع مرور الوقت مع تطورها. لا توجد حاجةٌ للقلق بشأن الملايين العديدة من التتابعات غير العاملة التي لن توجد مطلقًا، شريطةَ أن تكون التتابعاتُ البروتينية خلال التطوُّر قد بدأَتْ بتحفيز التفاعلات على نحوٍ أفضل ممَّا هو الحال في غياب البروتينات، ثم تحسَّنَتْ بالتدريج عبر الزمن التطوري. ومن السهل أن نرى من حيث المبدأ كيف يمكن لتغيراتٍ تدريجيةٍ متتابِعةٍ، كل منها يغيِّر التتابُعَ أو يُضيف إلى طوله، أن تحسِّن البروتين.

إن معرفتنا عن الكيفية التي تعمل بها البروتينات تدعم هذا. عادةً ما يكون الجزءُ الضروري للنشاط الكيميائي للبروتين جزءًا صغيرًا للغاية من التتابع؛ فأي إنزيم تقليدي تكون به حفنةٌ من الأحماض الأمينية التي تتفاعل ماديًّا مع المادة الكيميائية التي يُفترَض أن يُغيِّرها الإنزيمُ، وأغلبُ الجزءِ المتبقي من سلسلة البروتين يوفر فقط منصةً تدعم بنيةَ الجزء المُشترِك في هذا التفاعل؛ يعني هذا ضمنًا أن عمل البروتين إنما يعتمد على نحوٍ حيوي على مجموعة صغيرة نسبيًّا من الأحماض الأمينية، بحيث يمكن لوظيفة

جديدة أن تتطوَّر من خلال عدد صغير من التغيرات في التتابع البروتيني. تمَّ التحقُّق من هذا في العديد من التجارب التي تعرَّضَتْ فيها تغييراتٌ مستحثَّة صناعيًّا بالتتابعات البروتينية للانتخاب بحيث تؤدِّي أنشطةً جديدة، وقد ثبت على نحوٍ مُثير للدهشة أنه من اليسير للغاية إحداثُ تحوُّلاتٍ جذرية في النشاط البيولوجي للبروتين من خلال إحدى هذه الوسائل — أحيانًا من خلال تغيير حمض أميني وحيد — وهناك أمثلة مشابهة من بين التغيرات المتطورة طبيعيًّا.

يمكن إعطاء إجابة مشابهة للسؤال المتعلق بالكيفية التي يمكن أن تتطور بها المسارات الخاصة بتفاعلات الإنزيمات المتتابعة، مثل تلك التي تصنع الموادَّ الكيميائيةَ التي تحتاجها الكائناتُ (انظر الفصل الثالث). قد يظنُّ المرءُ أنه — حتى لو كانت المنتجات النهائية مفيدةً — سيكون من المستحيل تطويرُ مثل هذه المسارات؛ نظرًا لأن التطور لا يتمتَّع بنظرة مستقبلية، ويعجز عن بناء سلسلة من تفاعلات الإنزيمات إلى أن تكون وظيفتها مكتملة. ومجددًا نقول إن حل هذا اللغز الظاهري بسيط؛ فالعديد من المواد الكيميائية المفيدة كان موجودًا على الأرجح في بيئة الكائنات المبكرة، ومع تطوُّرِ الحياة صارت هذه المواد شحيحةً، والكائنُ الذي يستطيع تغييرَ مادة كيميائية مشابِهة إلى مادة مفيدة سيستفيد من ذلك، ومن ثَمَّ يمكن تطويرُ أحد الإنزيمات لتحفيز ذلك التغير؛ عندئذٍ ستُصنَّع المادةُ الكيميائية المفيدة من المادة القريبة لها، ومن ثَمَّ سيحظى بالتفضيل مسارٌ بيوتخليقي قصير، له سلف ومنتج نهائي. وعن طريق خطوات متتابعة كهذه، يمكن تطويرُ مسارات عكسية بدايةً من منتجاتها النهائية، بحيث تُراكِم المواد الكيميائية التي تحتاجها الكائنات.

إذا كانت أوجه التكيُّف المعقَّدة تتطوَّر فعلًا في خطوات، كما يقترح علماءُ الأحياء التطوريون، فمن المفترض إذن أن نعثر على أدلةٍ على المراحل الوسيطة في تطوُّر هذه السمات؛ وهناك مصدران لهذه الأدلة: الأشكالُ الوسيطة في السجل الحفري، والأنواعُ الموجودة حاليًّا التي تُظْهِر مراحلَ وسيطةً بين المراحل البسيطة وتلك الأكثر تعقيدًا. في الفصل الرابع وصفنا أمثلةً على الحفريات الوسيطة التي تربط أشكالًا مختلفةً للغاية، وهذه تدعم مبدأَ التغيرات التطورية التدريجية. بطبيعة الحال، في حالات عديدة يكون هناك غيابٌ كاملٌ للأشكال الوسيطة، خاصةً مع التوغُّل في الماضي. وعلى وجه الخصوص، التقسيمات الكبرى للحيوانات العديدة الخلايا، بما فيها الرخويات ومفصليات الأرجل والفقاريات، ظهرت كلها تقريبًا على نحوٍ مباغِت في العصر الكمبري (منذ أكثر من

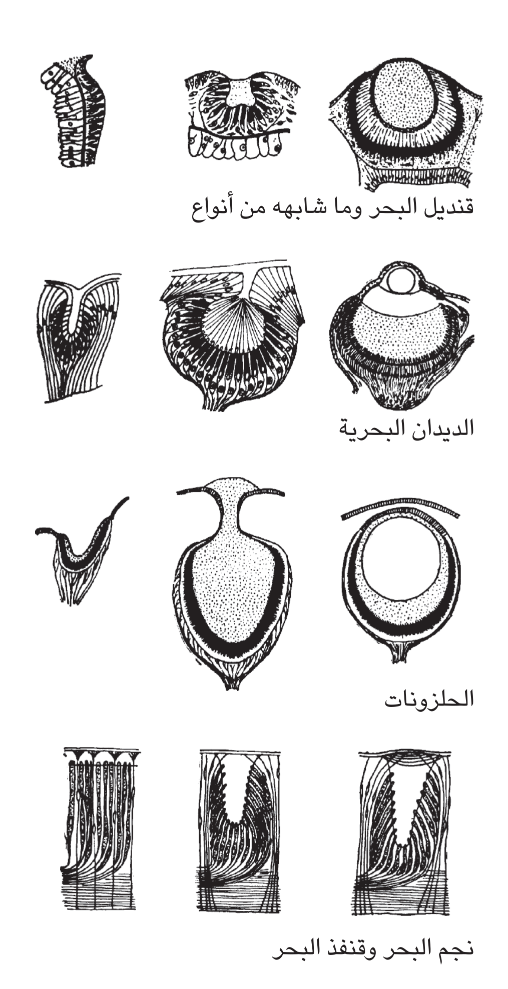
٥٠٠ مليون عام مضت)، ولا توجد تقريبًا أدلة حفرية تخصُّ أسلافَها، ودراساتُ تتابعاتِ الدي إن إيه الحديثة التي تناولَتِ العلاقات بينها، تقترح بقوة أن هذه المجموعات كانت بالفعل سلالاتٍ منفصلةً من قبل العصر الكمبري بكثيرٍ (الشكل ٦-٢)، لكننا ببساطةٍ لا نملك معلوماتٍ عمَّا كانت تبدو عليه، وهو ما يعود على الأرجح إلى أجسامها الرخوة؛ ومن ثَمَّ صعوبة تحجُّرها على صورة حفريات. بَيْدَ أن عدم اكتمال السجل الحفري لا يعني أن الأشكال الوسيطة لم يكن لها وجود؛ إذ يتم اكتشاف أشكال وسيطة على نحو مستمر، وأحد تلك الاكتشافات الحديثة يتمثَّل في حفريةٍ لأحد الثدييات عمرها ١٢٥ مليون عام في الصين، تحمل سماتٍ مشابِهةً للثدييات المشيمية الحديثة، لكنها أقدم بأكثر من ٤٠ مليون عام من أقدم حفرية معروفة في السابق من هذا النوع.

النوع الثاني من الأدلة، القادم من مقارنات الأشكال الحية، هو مصدر المعلومات الوحيد بشأن الملامح الجسدية التي لا تُحفَظ على صورة حفريات. أحد الأمثلة البسيطة، ولكن الدامغة، يتمثَّل في الطيران، وهو ما أوضحه داروين في الفصل السادس من كتابه «أصل الأنواع». فلا توجد حفريات تربط الخفافيش بالثدييات الأخرى، وأولى حفريات الخفافيش، التي عُثِر عليها في رواسب عمرها أكثر من ٦٠ مليون عام، لها نفس الأطراف المعدَّلة التي تتمتَّع بها الخفافيش الحديثة؛ لكن هناك أمثلة عديدة لثدييات حديثة تمتلك القدرةَ على الانزلاق في الهواء، لكن ليس الطيران، وأكثر هذه الأنواع شيوعًا هي السناجب «الطائرة»، الشبيهة بدرجة كبيرة بالسناجب العادية فيما عدا وجود زوائد جلدية مفلطحة تربط كل طرف أمامي بطرف خلفي؛ هذه الزوائد تعمل عملَ جناحين بدائيين، وتمكِّن السنجابَ من الانزلاق في الهواء لمسافةٍ ما إذا ما دفَعَ نفسه في الهواء. تطوَّرَتْ أوجهُ تكيُّفٍ أخرى من أجل الانزلاق على نحو مستقل في ثدييات أخرى، منها ما يُطلَق عليه الليمورات الطائرة (وهي ليست ليمورات حقيقية، وليست لها علاقة بالسناجب الطائرة)، وكذلك «شوجر جلايدر» الذي ينتمي إلى الجرابيات، وهناك أنواع أخرى منزلقة معروفة من السحالي والثعابين والضفادع. من السهل أن نتصوَّرَ كيف أن امتلاك القدرة على الانزلاق يُقلِّل خطرَ أن يتعرَّض الحيوانُ الذي يعيش في الأشجار للإمساك والالتهام من طرف أي مفترس، وأن الانزلاق يمكن أن يتطوَّر عن طريق التعديل التدريجي لجسد الحيوان الذي يقفز بين أفرع الشجر. من الواضح أن الزيادة التدريجية في مساحة الجلد المستخدَم في الانزلاق، وتعديلات الأطراف الأمامية كي تدعم هذه الزيادة؛ تفيد الكائن. تمتلك الليمورات الطائرة غشاءً كبيرًا قابلًا للتمدد يمتد من

الرأس إلى الذيل، وهذا شبيه للغاية بأجنحة الخفافيش، بالرغم من أن الحيوانات يمكنها فقط أن تنزلق، لا أن تطير. وبمجرد تطوُّر بنيةٍ للجناح تمكِّن الكائنَ من الانزلاق الفعَّال للغاية، يصير من السهولة تصوُّر نموِّ عضلاتٍ للجناح تمكِّنه من إنتاج ضربات قوية.

يُعَدُّ تطورُ العين مثالًا آخَر، تدبَّرَه داروين بالمثل. إن عين الفقاريات لها بنية شديدة التعقيد، بخلاياها الحساسة للضوء وشبكيتها، والقرنية الشفافة والعدسات التي تعمل على أن تتركَّز الصورة على الشبكية، والعضلات التي تضبط التركيز. كل الفقاريات تمتلك بالأساس تصميمَ العين نفسه، لكن في وجود العديد من التنويعات فيما يخصُّ تفاصيل التكيُّف مع أنماط الحياة المختلفة. كيف يمكن لهذه الآلة المعقَّدة أن تتطور، في حين أن العدسة وحدها ستكون بلا فائدة دون شبكية، والعكس بالعكس؟ الإجابة هي أن الشبكية بالتأكيد ليست عديمة الفائدة دون عدسة، فالعديد من أنواع الحيوانات اللافقارية له أعين بسيطة ليس بها عدسات، ومثل هذه الحيوانات لا تحتاج إلى الرؤية بوضوح؛ إذ يكفيها أن ترى الضوءَ والظلام كي ترصد المفترسين. في الواقع، ثمة سلسلة كاملة من الأشكال الوسيطة بين المستقبلات الحسَّاسة للضوء والأجهزة المتعدِّدة التي تُنتِج صورًا للعالم، يمكن رؤيتها في مجموعات الحيوانات المختلفة (الشكل ٧-١). وحتى حقيقيات النوى الوحيدة الخلية تستطيع رصْدَ الضوء والاستجابة له، عن طريق المستقبلات المكوَّنة من مجموعاتٍ من جزيئات بروتين الرودوبسين الحسَّاس للضوء. وابتداءً من قدرة الخلايا البسيطة على رصد الضوء، من السهل تصوُّرُ سلسلة من الخطوات تتطوَّر فيها قدراتُ رصْدِ الضوء المحسنة على نحوٍ تدريجي، بما يؤدِّي في النهاية إلى وجود عدسة قابلة لضبط بؤرة التركيز تنتج صورة واضحة. وقد عبَّرَ داروين عن الأمر بالكلمات التالية:

> في الأجساد الحية، سيتسبَّب التفاوتُ في أبسط التغييرات ... وسوف ينتقي الانتخابُ الطبيعي بمهارةٍ معصومةٍ من الخطأ كلَّ تحسين؛ فإذا ما افترضنا أن هذه العملية مستمرة منذ ملايين السنوات، وخلال كل عام تجري على ملايين الأفراد من مختلف الأنواع، أفلا يمكننا أن نصدق إمكانية أن تتكوَّن أداةٌ بصرية حية بهذه الصورة ... تفوق تلك الخاصة بالأدوات الزجاجية؟




شكل ٧-١: أعين مجموعة من الحيوانات اللافقارية. من اليمين إلى اليسار، يُظهِر كلُّ صفٍّ على نحوٍ متتابع أنواعًا أكثر تعقيدًا من الأعين، تملكها أنواع مختلفة داخل مجموعة واحدة؛ على سبيل المثال: في الديدان البحرية (الصف الثاني)، تتكوَّن العين الأولى الموجودة في اليمين من عدد قليل من الخلايا الصبغية والحساسة للضوء، بها قرن شفاف يبرز من المنتصف. تتكوَّن العين الموجودة في المنتصف من حجيرة مملوءة بسائل هلامي شفاف وشبكية بها عدد أكبر من الخلايا الحساسة للضوء، أما العين الموجودة في اليسار فبها عدسةٌ كروية أمام الحجيرة، وعددٌ أكبر بكثير من مستقبلات الضوء.

## لماذا نشيخ؟

إجمالًا، تُثير أجسادُ الكائنات الشابة دهشتنا، مثل العين، بوصفها أجزاءً من آلات بيولوجية تقارب الكمال، والمشكلة المقابلة لتفسير هذا الكمال التقريبي تطرحها حقيقة أنه لا يدوم لفترة طويلة خلال عمر الكائن؛ فلماذا يسمح التطور بحدوث هذا؟ إن تدهور الكائن شبه الكامل إلى ظلٍّ واهنٍ لنفسه نتيجةَ الشيخوخة كان الموضوع المفضَّل للشعراء، خاصةً حين يتنبئون بما يحدث لحبيباتهم:

ثم أسأل نفسي عن قيمة جمالك هذا،
ما دام سيفنى في المستقبل،
لأننا نعرف أن الأشياء العذبة والجميلة تبلى،
وتموت سريعًا بينما غيرها يكبر؛
فلا شيء يستطيع أن يوقف زحف الزمن،
سوى التناسل، الذي يتحدَّى حتمية الموت.

مقتطف من سونيتة رقم ١٢ لويليام شكسبير

بطبيعة الحال، ليست الشيخوخة مقتصرةً على البشر وحدهم؛ إذ رُصد أنها تصيب كل الحيوانات والنباتات تقريبًا. ولقياس الشيخوخة، يمكننا دراسة أفراد عديدين ظلوا في بيئات محمية، تخلو من مسببات الموت «الخارجية» مثل الافتراس؛ حيث يعيش الأفراد لفترة أطول بكثير مما يعيشونه في الطبيعة. وبمتابعة هؤلاء الأفراد مع مرور الوقت، يمكننا تحديد احتمالات الوفاة في الأعمار المختلفة. تكون نسبة الوفيات مرتفعةً عادةً بالنسبة إلى الأفراد الصغار السن، حتى في الظروف المحمية، وتنخفض حينما يتقدَّم الأطفال في السن وتصير أجسادهم أكبر، لكنها تزيد بعد ذلك ثانيةً بعد فترة البلوغ. في أغلب الأنواع التي خضعت للدراسة بحرص، تزيد نِسَبُ الوفيات بين الكبار بنحوٍ ثابت مع التقدُّم في العمر، إلا أن أنماط الوفاة تتباين تباينًا شاسعًا باختلاف الأنواع؛ فالكائنات الصغيرة القصيرة العمر كالفئران تعاني من نِسَب وفيات أعلى بكثيرٍ في أعمار أصغر نسبيًّا مقارَنةً بالكائنات الكبيرة الطويلة العمر كالبشر.

هذه الزيادة في نِسَب الوفيات تعكس تدهورَ العديد من الوظائف البيولوجية مع التقدُّم في العمر؛ فكل شيء تقريبًا يبدو أن حاله يسوء، من القوة العضلية إلى القدرة

العقلية. إن شيوع الشيخوخة بشكل عام في الكائنات العديدة الخلايا (وهو ما يبدو نوعًا من التدهور) قد يبدو أنه يطرح صعوبةً خاصة أمام نظرية التطور، تعارِض فكرةَ أن الانتخاب الطبيعي يتسبَّب في تطور التكيف. إحدى إجابات هذا هي أن التكيُّفَ لا يكون مثاليًّا أبدًا؛ فالشيخوخة نتيجة لا يمكن تجنُّبها للضرر التراكمي الذي يصيب الأجهزة اللازمة للبقاء، وعلى الأرجح يعجز الانتخابُ ببساطةٍ عن الحيلولة دون ذلك. وفي الواقع، الاحتمالات السنوية لفشل الماكينات المعقَّدة، كالسيارات، تزيد أيضًا مع التقدُّم في العمر، على نحوٍ مشابهٍ لنِسَب الوفيات بين الكائنات الحية.

لكن لا يمكن أن تكون هذه القصة الكاملة؛ فالكائنات الوحيدة الخلية كالبكتيريا تتكاثر بسهولة بواسطة الانقسام إلى خلايا وليدة، وسلالاتُ الخلايا المنتجة بواسطة هذه الانقسامات استمرت لمليارات السنين؛ فهي لا تشيخ، وإنما تكسِّر المكونات التالفة وتستعيض عنها بأخرى جديدة، ويمكنها الاستمرار في التكاثر إلى ما لا نهاية، شريطة أن يزيل الانتخابُ الطبيعي الطفراتِ الضارةَ. هذا ممكن أيضًا في الخلايا المستنبَتة صناعيًّا لبعض الكائنات، مثل ذباب الفاكهة. إن سلالات الخلايا التناسلية للكائنات العديدة الخلايا تتجدَّد هي الأخرى كلَّ جيل، فلماذا إذن لا تبلغ عمليةُ الإصلاحِ الكائنَ بأكمله؟ لماذا تصاب غالبية أجهزة الجسم بالتدهور الناتج عن الشيخوخة؟ على سبيل المثال: تَبلَى أسنان الثدييات مع التقدم في العمر، وهو ما يؤدِّي في النهاية إلى موتها جوعًا في الطبيعة. ليس هذا أمرًا حتميًّا، فأسنانُ الزواحف تتجدَّد من وقت لآخَر. وتعكس معدلات الشيخوخة المتباينة بين الأنواع المختلفةِ الفعاليةَ المتباينة لعمليات الإصلاح والمدى الذي تستمر به هذه العملياتُ مع التقدُّم في العمر؛ فالفأر يُتوقَّع له أن يعيش ثلاثَ سنوات بحدٍّ أقصى، بينما الإنسان يعيش أكثر من ثمانين عامًا. هذه الاختلافات بين الأنواع تشير إلى أن الشيخوخة تخضع للتطور؛ ومن ثَمَّ لم تَعُدِ الشيخوخةُ تتطلَّب تفسيرًا تطوريًّا.

رأينا في الفصل الخامس أن الانتخاب الطبيعي في الكائنات العديدة الخلايا يعمل من منظور الاختلافات في مساهمات الأفراد في الجيل التالي، من خلال الاختلافات في أعداد النسل الذي ينتجونه، علاوةً على فرصهم في البقاء. بالإضافة لذلك، كلُّ أفراد الكائنات يواجهون خطرَ الوفاة بفعل حوادث أو أمراض أو افتراس. وحتى لو كانت احتمالاتُ الوفاة من هذه المسببات مستقلةً تمامًا عن العمر، فإن احتمالات البقاء تنخفض مع التقدُّم في العمر، لدى البشر، كما هو الحال لدى السيارات؛ فإذا كانت احتماليةُ البقاء من عامٍ إلى العام الذي يليه ٩٠ بالمائة، فإن احتمالية البقاء لخمسة أعوام تبلغ ٦٠ بالمائة،

لكن عبر ٥٠ عامًا تبلغ الاحتمالية ٠٫٥ بالمائة فقط؛ ومن ثَمَّ يحابي الانتخابُ البقاءَ والتكاثُرَ في وقت مبكر من الحياة وليس في وقت متأخِّر منها، ببساطة لأنه في المتوسط، سيكون المزيد من الأفراد أحياءً بما يمكنهم من الخضوع للتأثيرات الجيدة. وكلما عظمَتْ نسبةُ الوفيات نتيجةَ الحوادث والأمراض والافتراس، زادت القوةُ التي يحابي بها التطورُ التحسيناتِ في وقت مبكر من الحياة، مقارَنةً بوقت متأخر منها؛ نظرًا لأن قلة من الأفراد يمكنهم البقاء أحياءً إلى أعمار متأخرة لو كانت نِسَبُ الوفيات الناتجة عن هذه المسببات الخارجية مرتفعةً.

هذه الحجة تقترح أن الشيخوخة تتطور بسبب القيمة الانتخابية الأعلى للعوامل التي يكون لها تأثيرات مرغوبة على بقاء الكائن أو خصوبته في مرحلة مبكرة من الحياة، مقارَنةً بالعوامل التي تؤثِّر في وقت متأخر من العمر. هذا المفهوم مشابِه لفكرة التأمين على الحياة المألوفة؛ فشراءُ تأمين على الحياة في سِنٍّ صغيرة يكلِّفك مبلغًا أقل؛ لأن من المرجح أنك ستتمتع بسنوات عديدة من الحياة تدفع فيها الأقساط مستقبلًا. هناك سبيلان رئيسيان قد يعمل بهما الانتخاب الطبيعي من أجل التسبُّب في الشيخوخة، وتبين الحجة الواردة أعلاه أن الطفرات ذات التأثيرات الضارة سيعمل الانتخابُ على محْوِها بدرجةٍ أكبر لو أن تأثيراتها ظهرت في وقت مبكر من الحياة. فالسبيل الأول الذي يمكن أن يتسبَّب به الانتخابُ في الشيخوخة، هو الحفاظ على ندرة الطفرات العاملة في مرحلة مبكرة من العمر داخل التجمعات، مع السماح للطفرات ذات التأثيرات التي تظهر في مرحلة متأخرة من العمر بأن تكون أكثر شيوعًا؛ في الواقع، تحدث أمراض وراثية شائعة عديدة لدى البشر بسبب الطفرات التي تظهر تأثيراتُها في مرحلة متأخرة من العمر، مثل تلك المرتبطة بمرض ألزهايمر. السبيل الثاني هو أن النُّسَخ المختلفة التي يكون لها تأثيرات مفيدة في فترة مبكرة من الحياة، سيكون من الأرجح أن تنتشر بين أفراد التجمع مقارَنةً بتلك التي تظهر تأثيراتُها المفيدة في الكِبَر. يمكن إذن أن تتطوَّر تحسيناتٌ في المراحل المبكرة من الحياة، حتى لو صاحَبَتْ هذه الفوائدَ تأثيراتٌ جانبية مُضِرة تظهر في وقت لاحق؛ على سبيل المثال: قد تعمل المستويات الأعلى لبعض الهرمونات التناسلية على تحسين خصوبة المرأة في مرحلة مبكرة من العمر، لكن على حساب الإصابة بسرطان الثدي أو المبيض في مرحلة لاحقة. تؤكِّد التجاربُ هذه التنبؤاتِ؛ فعلى سبيل المثال: يمكننا الاحتفاظ بتجمعات من ذبابة الفاكهة «دروسوفيلا ميلانوجاستر» عن طريق استيلاد الأفراد الكبيرة في العمر للغاية فحسب، وفي غضون بضعة أجيال، تُطوِّر هذه التجمعاتُ

عمليةَ شيخوخة أبطأ، لكن على حساب انخفاض النجاح التكاثري في فترة مبكرة من العمر.

تتنبَّأ نظريةُ التطور فيما يخص الشيخوخة بأن الأنواع ذات نِسَب الوفيات المنخفضة ذات المسبب الخارجي، من المفترض أن تكون لها معدلات شيخوخة منخفضة وتتمتع بمعدلات عمرية أطول، مقارَنةً بالأنواع ذات نِسَب الوفيات ذات المسبب الخارجي الأعلى. وهناك بالفعل علاقة قوية بين حجم الجسم ومعدل الشيخوخة، فالأنواع الأصغر من الحيوانات تميل إلى أن تشيخ بمعدل أسرع من الأنواع الأكبر حجمًا، وإلى التكاثر في وقت مبكر من أعمارها؛ يعكس هذا على الأرجح القابليةَ الكبرى لدى العديد من الحيوانات الصغيرة للتعرُّض للحوادث والافتراس. وبين الأنواع ذات أحجام الجسم المتشابهة، تصير الاختلافاتُ الكبيرة في معدلات الشيخوخة بين الحيوانات ذات المعدلات العمرية المتفاوتة؛ منطقيةً ومفهومةً حين نتدبَّر مخاطِرَ الافتراس التي تتعرَّض هذه الحيوانات لها. يتميز العديد من الكائنات الطائرة بطول العمر، وهو أمر منطقي لأن الطيران يُعَدُّ وسيلةَ دفاعٍ جيدة ضد الافتراس، وطائرٌ صغير نسبيًّا كالببغاء يمكن أن يتمتَّع بمعدل عمري أطول من الإنسان، كما تعيش الخفافيش لفترات أطول من الثدييات الأرضية التي لها أحجام جسمانية مقارِبة كالفئران.

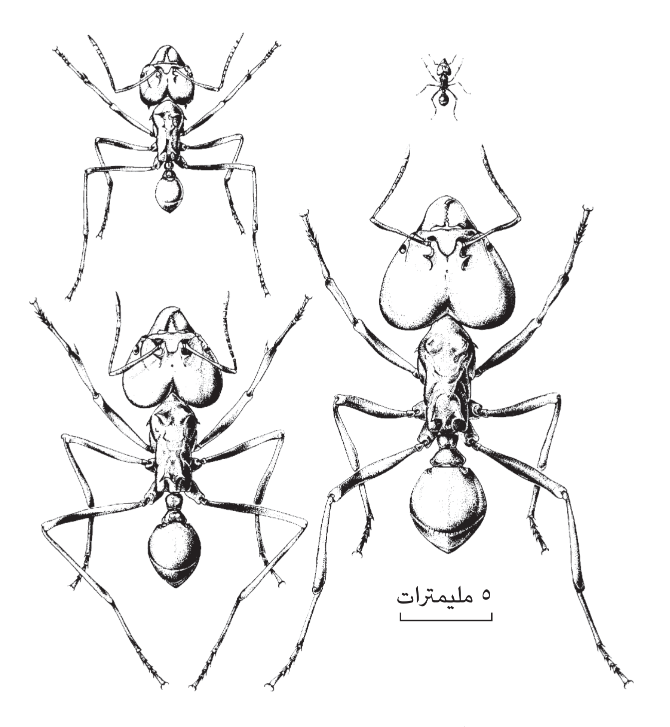
البشر أنفسهم يمكن أن يكونوا مثالًا لتطور معدلات الشيخوخة الأبطأ؛ فأقرب نوع إلينا — الشمبانزي — يندر أن يعيش أكثر من ٥٠ عامًا، حتى في الأسر، ويبدأ التكاثر في مرحلة مبكرة من العمر مقارَنةً بالإنسان، بمتوسط عمر يبلغ ١١ عامًا؛ ومن ثم خفَّضَ البشرُ على الأرجح معدلاتِ الشيخوخة الخاصة بهم منذ الانفصال عن سلفنا المشترك مع القردة، وأجَّلوا مرحلةَ النضج الجنسي. هذه التغييرات تحدث غالبًا نتيجةَ زيادةِ الذكاء والقدرة على التعاون، اللتين قلَّلَتا تعرُّضَ البشر لمسبِّبات الوفاة الخارجية، وقلَّلَتا مزيةَ التكاثر في سن مبكرة. ومن الممكن رصْدُ تغيرٍ في المزايا النسبية للتكاثر المبكر في مقابل المتأخِّر، بل يمكن قياسه أيضًا، في المجتمعات الموجودة في وقتنا الحالي؛ فقد أدَّى التصنيع إلى انخفاض حادٍّ في نِسَب الوفاة بين البالغين، وهو أمر يتضح جليًّا في الإحصاءات السكانية، وهذا يغيِّر الانتخابَ الطبيعي الذي يؤثِّر على عملية الشيخوخة في التجمعات السكانية. تدبَّرْ مرضَ هنتنجتون التنكسي الذي يصيب المخ، والذي يسبِّبه جينٌ نادرٌ طافرٌ؛ هذا المرض يبدأ في الظهور في سن متأخرة (في الثلاثينيات من العمر أو بعد ذلك). وفي أي تجمُّع به معدل وفيات مرتفع ويعاني من سوء التغذية، يوجد عدد قليل للغاية

من الأفراد هم مَن سيصلون إلى سن ٤٠ عامًا، ولن يكون لحاملي مرض هنتينجتون في المتوسط إلا نسبة أقل من النسل (٩ بالمائة) مقارَنةً بالأفراد غير المصابين بالمرض. في المجتمعات الصناعية، ذات نِسَب الوفيات المنخفضة، كثيرًا ما ينجب الأفرادُ أبناءَهم في الأعمار التي يمكن أن يظهر فيها المرضُ؛ ومن ثَمَّ فإن الأفراد المصابين يكون لديهم أبناء أقل بنسبة ١٥ بالمائة مقارَنةً بالأفراد غير المصابين؛ وإذا استمرَّتِ الظروفُ الحالية، فسيقلِّل الانتخابُ تدريجيًّا معدلاتِ تواتُرِ الجينات الطافرة التي تظهر تأثيراتُها في مرحلة متأخرة من الحياة التكاثرية، وستنخفض معدلاتُ البقاء الخاصة بالأفراد الأكبر سنًّا. إن الجينات النادرة ذات التأثيرات الضخمة مثل مرض هنتنجتون، لها تأثيرات بسيطة للغاية على التجمع ككلٍّ، لكن العديد من الأمراض الأخرى الواقعة تحت سيطرة الجينات ولو جزئيًّا، تصيب بالأساس الأفرادَ في فترة منتصف العمر أو الكبار في السن، بما في ذلك أمراض القلب والسرطان. وقد نتوقَّع أن ينخفض معدلُ هذه الجينات مع مرور الوقت بسبب هذا الانتخاب الطبيعي، وإذا استمرت معدلاتُ الوفاة المنخفضة التي تميِّز المجتمعات الصناعية كما هي لعدة قرون (وهو أمر مشكوك فيه)، فسيكون هناك تغيُّر جيني بطيء، ولكن ثابت، نحو معدلات الشيخوخة المنخفضة.

## تطوُّر الطبقات الاجتماعية العقيمة

مشكلةٌ أخرى تواجِهُ نظريةَ التطور يطرحها وجودُ أفراد عقيمة في أنواع معيَّنة من الحيوانات الاجتماعية؛ ففي مجتمعات الدبابير والنحل والنمل الاجتماعية، تكون الإناثُ داخل العش هي الشغالات، ولا تتكاثر؛ فالإناث المتكاثِرة هي أقلية بسيطة داخل المستعمرة (عادةً ما تكون ملكة واحدة فحسب)، أما الإناث الشغالة فتعتني بنسل الملكة وتحافظ على العش وتزوِّده بالمؤن. وفي المجموعة الرئيسية الأخرى من الحشرات الاجتماعية — النمل الأبيض — يمكن لكلٍّ من الذكور والإناث أن يسلك سلوك الشغالات. ولدى الحشرات الاجتماعية المتقدمة، يوجد عادةً العديد من «الطبقات»، التي تؤدِّي أدوارًا مختلفة للغاية، وتتميز باختلافات في السلوك والحجم والبنية الجسدية (الشكل ٧-٢).

ثمة اكتشاف حديث مهم يتمثَّل في أن القليل من الأنواع من الثدييات التي تتشارَك أعشاشها، له تنظيمات اجتماعية تشبه هذه الحشرات، بحيث يكون أغلبُ أفراد العش عقيمًا؛ أشهر هذه الأنواع هو فأر الخلد العاري، وهو نوع من القوارض الحفارة يسكن المناطقَ الصحراوية في جنوب أفريقيا، فقد يسكن العشَّ الواحد عشرات الأفراد، لكن




شكل ٧-٢: طبقات النمل الشغَّالة في مجموعة النمل القاطعة للأوراق المعروفة باسم «أتا»، وكلها من المستعمرة عينها. الشغالة الصغيرة بأعلى اليمين تعتني بحدائق الفطريات التي يزرعها هذا النوع، أما النملات العملاقة فهي الجنود، التي تحرس العش.

أنثى واحدة فقط هي التي تتمتع بالخصوبة للتكاثر، وإذا ماتت هذه الأنثى، ينشب صراعٌ بين الإناث الأخريات من أجل الحلول محلها، تنتصر فيه واحدة منها فقط؛ ومن ثَمَّ فقد تطوَّرت منظومات لحيوانات اجتماعية بها أفراد شغالة عقيمة في مجموعات مختلفة تمامًا من الحيوانات. تطرح هذه الأنواع مشكلاتٍ واضحةً أمام نظرية الانتخاب الطبيعي؛ كيف يمكن أن تتطوَّر الأفراد بحيث تتخلَّص من القدرة على التكاثر؟ كيف يمكن لأوجه التكيُّف المتطرفة للغاية عادةً لدى طبقات الشغالة، التي تلائم أدوارها

المتخصصة، أن تتطوَّر من الأساس، خاصةً أن الأفراد الشغالة نفسها لا تتكاثر؛ ومن ثَمَّ لا يمكن أن تكون معرَّضةً بنحوٍ مباشِرٍ للانتخاب الطبيعي؟

أثار داروين هذه الأسئلة، وأجاب عنها جزئيًّا، في كتابه «أصل الأنواع»، ويكمن الجواب في أن أفراد أي مجموعة اجتماعية، كعش فأر الخلد العاري أو عش النمل، تكون في المعتاد أقرباء وثيقة القرابة بعضها ببعض، وعادةً ما تتشارك الأمَّ والأبَ أنفسَهما. وأيُّ نسخة جينية بديلة تجعل حامِلَها يتخلَّص من القدرة على التكاثر من أجل المساعدة في تنشئة الأقرباء، قد تساعد جيناتِ الأقرباء في المرور إلى الجيل التالي، وعادةً ما تكون جيناتُ الأقرباء (بفضل القرابة) هي عينها جينات الفرد المعاوِن (في حالة الأخ والأخت، لو ورث أحدُ الفردين نسخةً بديلةً لجين معين من أحد الأبوين، تبلغ احتماليةُ أن يرث الآخَرُ النسخةَ البديلة عينها خمسين بالمائة). وإذا نتج عن تضحية الفرد العقيم زيادةٌ كافية في عدد الأقارب الأحياء القادرة على التكاثر، فإن الزيادة في عدد نُسَخ «جين الشغالة» يمكن أن تفوق الانخفاضَ الناجم عن فقدانها لنجاحها التكاثري. إن الزيادة المطلوبة للتفوق على الخسارة تصير أصغرَ كلما كانت درجةُ القرابة أوثَقَ، وقد عبَّرَ جيه بي إس هالدان عن الأمر ذات مرةٍ بقوله: «أنا مستعِدٌّ للتضحية بحياتي في مقابل أن يعيش لي شقيقان أو ثمانية من أبناء العم.»

يوفر مبدأ «انتخاب القرابة» هذا إطارَ عملٍ لفهم أصول العقم لدى الحيوانات الاجتماعية، وقد بيَّنَتِ الأبحاثُ الحديثة أن بإمكانه تفسيرَ العديد من التفاصيل الخاصة بالمجتمعات الحيوانية، بما فيها تلك التي تملك ملامحَ أقلَّ تطرُّفًا من الطبقات العقيمة؛ على سبيل المثال: في بعض أنواع الطيور، لا تحاوِلُ الذكورُ الشابة التزاوُجَ، وإنما تواصِلُ لعبَ أدوارٍ «مساعدة» في أعشاش الآباء بينما لا يزال الأشقاءُ الصغار موضعَ رعايةٍ. وعلى نحوٍ مشابِه، تُجالس الكلابُ البرية صغارَ أفراد القطيع أثناء خروج أفراد القطيع للصيد.

إن السؤال بشأن الكيفية التي تنشأ بها الاختلافات بين طبقات الشغالة العقيمة مختلفٌ قليلًا، لكن له إجابة مشابهة؛ فالنمو كعضوٍ بطبقة شغالة معينة أمرٌ تحكمه عواملُ بيئية، مثل مقدار وجودة الغذاء الذي يُقدَّم للفرد وهو في مرحلة اليرقة. ومع ذلك، فالقدرة على الاستجابة لهذه العوامل عادةً ما تكون محدَّدةً وراثيًّا؛ فقد تمنح نسخةٌ جينية بديلة لعضوٍ عقيم بمستعمرة للنمل القدرةَ على النموِّ كي يصير، مثلًا، أحدَ الجنود (فيكون له فكٌّ أكبر من النملة الشغالة العادية) لا أن يظل فرد شغالة فحسب.

فإذا كانت المستعمرة ذات الجنود أفضل دفاعًا ضد الأعداء، وإذا كانت المستعمرات ذات هذه النسخة البديلة يمكنها إنتاج أفراد متكاثرين أكثر في المتوسط، فستزيد هذه النسخة البديلة من نجاح المستعمرة التي توجد فيها. وإذا كانت الأفرادُ النَّشِطة تكاثُريًّا بالمستعمرة أقاربَ وثيقةَ القرابةِ بالشغالة، فإن النسخة البديلة التي تحثُّ بعضَ الشغالة على أن تصير جنودًا سوف تُنقَل بواسطة المستعمرة عن طريق الملكة والذكور الذين يعمرون مستعمرات جديدة؛ ومن ثَمَّ يمكن أن يعمل الانتخابُ على زيادة تمثيل هذه النسخة بين مستعمرات ذلك النوع.

هذه الأفكار تُلقي الضوءَ أيضًا على تطوُّر الكائنات العديدة الخلايا من أسلافها الوحيدة الخلية؛ فالخلايا الناتجة عن اتحاد البويضة والحيوان المنوي تظل مترابِطةً، وأغلبها يفقد القدرةَ على أن يصير خلايا جنسية وأن يسهم على نحوٍ مباشِرٍ في الجيل التالي. وبما أن الخلايا المعنِيَّة كلها متماثِلةٌ جينيًّا، فسيكون هذا مفيدًا لو أن البقاءَ والتكاثُرَ يزدادان على نحوٍ كافٍ في مجموعة الخلايا المترابطة، مقارَنةً بالبديل المتمثِّل في الخلية الوحيدة. إن الخلايا غير المتكاثرة «تضحِّي» بتكاثُرها لصالح مجتمع الخلايا كله، وبعض هذه الخلايا محكومٌ عليه بالفناء خلال عملية النمو، في أثناء عملية تكوُّن الأنسجة وتحلُّلها، والكثير منها يفقد قدرته على الانقسام، كما أوضحنا عند مناقشة تطوُّر الشيخوخة. وحين تستعيد الخلايا قدرتَها على الانقسام دون اعتبارٍ للكائن، يكون لهذا تبعاتٌ خطيرة تتمثَّل في السرطان؛ فتمايُز الخلايا إلى أنواع مختلفة خلال النمو يشبه تمايُزَ الطبقات لدى الحشرات الاجتماعية.

## أصل الخلايا الحية وأصل الوعي البشري

ثمة مشكلتان كبيرتان ظلَّتَا بغير حلٍّ إلى الآن تكتنفان مفهومَ التطور، وهما تقعان على أقصى طرفَيِ النقيض فيما يخصُّ تاريخَ الحياة، وهاتان المشكلتان هما أصل الملامح الأساسية للخلايا الحية، وأصل الوعي البشري. وخلافًا للأسئلة التي عكفنا إلى الآن على مناقشتها، فإن هذين الأمرين يمثِّلان حدَثَيْن متفرِّدين في تاريخ الحياة، وتفرُّدُهما هذا يعني أننا لا نستطيع المقارنةَ بين الأنواع الحية بحيث نخرج باستنتاجات موثوق فيها بشأن الكيفية التي حدث بها كلا الأمرين. علاوةً على ذلك، فإن افتقارنا لأيِّ سجل حفري يخصُّ الفترةَ المبكرة للغاية من تاريخ الحياة، أو يخصُّ السلوكَ البشري، إنما

يعني أننا لا نملك أيَّ معلومات مباشِرة عن تتابُعات الأحداث ذات الصلة. هذا، بطبيعة الحال، لا يمنعنا من التخمين بشأن ما يمكن أن تكون عليه هذه الأحداث، لكن مثل هذه التخمينات لا يمكن اختبارها بالطريقة ذاتها التي وصفناها لاختبار الأفكار المتعلِّقة بالمشكلات التطورية الأخرى.

في حالة أصل الحياة، يتمثَّل هدفُ الأبحاث الجارية في العثور على الظروف التي تشبه تلك الظروفَ التي سادت في مرحلة مبكرة من عُمْر الأرض، والتي تسمح بالتجميع الكيميائي الخالص للجزيئات القادرة على مضاعفة نفسها، تمامًا مثلما يُنسَخ الدي إن إيه الموجود في خلايانا خلال عملية الانقسام الخلوي؛ وما إنْ تتكوَّن هذه الجزيئات القادرة على التضاعف الذاتي، يكون من اليسير تخيُّلُ كيف يمكن للتنافُس بين المجموعات المختلفة من الجزيئات أن يؤدِّي إلى تطوُّر جزيئات أكثر دقةً وأسرع تضاعُفًا، بمعنى أن الانتخاب الطبيعي سيعمل على تحسينها. وقد حقَّقَ الكيميائيون نجاحًا كبيرًا في توضيح أن الوحدات البنائية الكيميائية الأساسية للحياة (السكر والدهون والأحماض الأمينية والعناصر المكوِّنة لكلٍّ من الدي إن إيه والآر إن إيه) يمكن تكوينُها من خلال تعريض محاليل الجزيئات البسيطة (من النوع الذي يُرَجَّح أنه كان موجودًا في المحيطات في الفترة المبكرة من تاريخ الأرض) إلى شرارات كهربائية وإشعاع فوق بنفسجي. وقد تحقَّقَ تقدُّمٌ بسيط في بيان كيفية تجمُّع هذه المكونات في جزيئات أكثر تعقيدًا تشبه جزيئات الدي إن إيه أو الآر إن إيه، بل تحقَّقَ أيضًا نجاحٌ أقل في عملية تحفيز هذه الجزيئات على القيام بالتضاعف الذاتي؛ ومن ثَمَّ فنحن لا نزال بعيدين عن تحقيق الأهداف المنشودة (لكننا نحقِّق نجاحًا على نحوٍ مطرد). علاوةً على ذلك، بمجرد أن يتحقَّقَ هذا الهدفُ، فإن السؤال بشأن كيفية تطوُّر شفرة وراثية بدائية تمكِّن أحدَ تتابعات الدي إن إيه أو الآر إن إيه القصيرة من تحديد تتابُع سلسلة بروتينية بسيطة؛ يجب الإجابة عنه. هناك العديد من الأفكار، لكن ما زلنا لا نملك حلولًا قاطعة لهذه المشكلة.

وعلى نحوٍ مشابِهٍ، لا نملك إزاء مسألة تطوُّر الوعي البشري سوى التخمين، بل إنه من الصعب تحديد طبيعة المشكلة بوضوح؛ نظرًا لصعوبة تعريف الوعي بدقة. إن أغلب الناس لا يعتبرون أن الطفلَ الوليد يمتلك وعيًا، ولن يماري أحدٌ في أن الأطفال ذوي العامين يملكون وعيًا إلا قليلًا منهم. كما أن المدى الذي تُعَدُّ به الحيوانات واعيةً هو محل جدل محتدم، لكنَّ مُحِبِّي الحيوانات الأليفة يدركون جيدًا قدرةَ الكلاب والقطط على الاستجابة لرغبات أصحابها وحالاتهم المزاجية، بل تبدو الحيوانات الأليفة كذلك

قادرةً على استغلال أصحابها بحيث ينفِّذون لها ما تريد؛ وعلى هذا، ربما يُعَدُّ الوعي على الأرجح مسألةَ درجات، لا نوعية، بحيث إنه من حيث المبدأ لا توجد صعوبة كبيرة في تصوُّر وجود تكثيف تدريجي للوعي الذاتي والقدرة على التواصل خلال عملية تطوُّر أسلافنا. البعض قد يعتبر القدرةَ اللغوية المعيارَ الأقوى لامتلاك وعي حقيقي، وحتى هذه اللغة تتطوَّر تدريجيًّا مع تقدُّم الأطفال في العمر، وإنْ كان هذا التطوُّر يتمُّ بسرعةٍ مدهشة. بالإضافة إلى ذلك، توجد مؤشرات واضحة على وجود قدرات لغوية بدائية لدى الحيوانات مثل الببغاوات والشمبانزي، التي يمكن تعليمها كيفيةَ توصيل معلومات بسيطة؛ فالفجوة بيننا وبين الحيوانات العليا ظاهريةٌ أكثر من كونها حقيقيةً.

وبالرغم من أننا لا نعرف شيئًا عن تفاصيل القوى الانتخابية التي تحرِّك تطوُّرَ القدرات العقلية واللغوية البشرية، والتي تتجاوز كثيرًا دون شكٍّ تلك القدراتِ الخاصةَ بالحيوانات الأخرى، فإنه لا يوجد غموض خاص يكتنف تفسيرها من المنظور التطوري. ويحقِّق علماء الأحياء تقدُّمًا سريعًا في فهم عمل المخ، وثمة شكٌّ قليل في أن كل أشكال النشاط العقلي يمكن تفسيرها في ضوء أنشطة الخلايا العصبية بالمخ؛ هذه الأنشطة لا بد أنها عرضة للتحكُّم من جانب الجينات التي تحدِّد نموَّ المخ وعمله، وشأنها شأن أي جينات أخرى، فهي معرَّضة للإصابة بطفرات، وهو ما يؤدِّي إلى وجود نُسَخ متباينة يمكن للانتخاب أن يعمل عليها. لم تَعُدْ هذه فرضيةً خالصةً؛ فقد عُثِر على طفرات تؤدِّي إلى قصورٍ في جوانب نحوية معينة في اللغة لدى مَن يحملها، وهو ما أدَّى إلى تحديد جين بعينه مسئول عن التحكم في بعض الجوانب النحوية. وحتى الطفرةُ التي تصيب تتابُعَ الدي إن إيه وتسبِّب الاختلافَ عن الطبيعي معروفةٌ كذلك.

الفصل الثامن

# خاتمة

ما الذي تعلَّمناه عن التطور خلال السنوات المائة والأربعين التي أعقبتْ نَشْر كلٍّ من داروين ووالاس أفكارهما للمرة الأولى؟ كما رأينا، نظرتُنا الحديثة مقارِبةٌ على نحوٍ مُثير للدهشة لنظرتهما، في ظلِّ وجود إجماع قوي على أن الانتخاب الطبيعي هو القوة الرئيسية المرشِدة لتطوُّر البنى والوظائف والسلوكيات. والاختلاف الأساسي هو أن التقدُّمَ الحادث على صعيدين بات يعني أن عملية التطور من خلال الانتخاب الطبيعي المؤثِّر على الطفرات العشوائية بالمادة الوراثية صارَتِ الآن أكثرَ جدارةً بالثقة عمَّا كانت عليه في بداية القرن العشرين؛ أولهما: أننا نملك مجموعةً أكبر من البيانات التي تبيِّن تأثيرَ الانتخاب الطبيعي على كل مستوًى من التنظيم البيولوجي، من الجزيئات البروتينية إلى الأنماط السلوكية المعقدة. وثانيهما: أننا بتْنا نفهم الآنَ أيضًا آليةَ الوراثة، التي كانت لغزًا مستعصيًا على داروين ووالاس. لقد صارت جوانبُ عديدةٌ للوراثة مفهومةً في الوقت الحالي تفصيلًا، بدايةً من الكيفية التي تُخزَّن بها المعلوماتُ الوراثية داخل الدي إن إيه، ووصولًا إلى الكيفية التي تتحكَّم بها هذه المعلوماتُ في سمات الكائن من خلال البروتينات التي تحدِّدها هذه المعلوماتُ، ومن خلال تنظيم مستويات إنتاجها. علاوةً على ذلك، نفهم الآن أن العديد من التغيرات في تتابعات الدي إن إيه ليس له تأثيرٌ يُذكَر — أو ليس له تأثيرٌ على الإطلاق — على عمل الكائن، بحيث إن التغيُّرات التطورية في التتابعات يمكن أن تقع بواسطة عملية الانحراف الوراثي العشوائية. تمكِّننا تكنولوجيا تحديدِ تتابعات الدي إن إيه من دراسة تبايُنِ المادة الوراثية نفسها وتطوُّرها، ومن استخدام الاختلافات بين التتابعات في إعادة بناء علاقات النسب بين الأنواع.

وهذه المعرفة بعلم الوراثة، إلى جانب فهمنا أن الانتخاب الطبيعي يحرِّك تطوُّرَ السمات الجسدية والسلوكية للكائنات، لا تعني وجودَ تحديد وراثي صارم لكل جوانب

تلك السمات؛ فالجينات تُرسِي فقط النطاقَ الممكن من السمات التي يمكن أن يُظهِرها الكائنُ الحي، أما السمات التي يُظهِرها الكائن بالفعل فأمرُها يعتمد على البيئة الخاصة التي يجد الكائنُ فيها نفسَه. لدى الحيوانات العليا، يلعب التعلُّمُ دورًا رئيسيًّا في السلوك، لكنَّ نطاقَ السلوك الذي يمكن اكتسابُه محدودٌ بفعل البنية المخية للحيوان، التي هي بدورها محدودة بفعل التركيب الوراثي للحيوان. ينطبق هذا بالتأكيد على كل الأنواع؛ فلن يتعلَّم كلب أبدًا الحديثَ (كما لن يصير إنسانٌ قادرًا على أن يشمَّ رائحةَ أرنب من على مسافة بعيدة). وبين البشر، هناك أدلةٌ قوية على اشتراك كلٍّ من العوامل الوراثية والعوامل البيئية في إحداث اختلافات في السمات العقلية، وسيكون من قبيل المفاجأة ألَّا ينطبق الأمرُ نفسه على نوعنا، شأننا شأن الحيوانات الأخرى. معظم التفاوت بين البشر موجود بين أفراد داخل تجمُّعات محلية، أما الاختلافات بين التجمعات فأقل للغاية؛ ومن ثَمَّ لا يوجد أساسٌ لمعامَلة المجموعات العِرقية بوصفها كياناتٍ متجانِسةً منفصلة، فضلًا عن نسبة أي «تفوُّق» وراثي لأي جماعة منها. هذا مثال للكيفية التي يمكن أن يقدِّم بها العلمُ معارفَ ترشد قرارات الناس بشأن القضايا الاجتماعية والأخلاقية، وإنْ كان لا يمكنه أن يحدِّد بدقةٍ ماهيةَ تلك القرارات.

إن السمات التي نعدُّها أكثرَ سمات البشر جوهريةً، مثل قدرتنا على التحدُّث والتفكير الرمزي، علاوةً على المشاعر التي ترشد علاقاتِنا الأسريةَ والاجتماعية، من المؤكد أنها تعكس عمليةً طويلة من الانتخاب الطبيعي بدأت منذ عشرات الملايين من السنوات، حين بدأ أسلافُنا العيشَ في مجموعات اجتماعية. وكما رأينا في الفصل السابع، فإن الحيوانات التي تعيش في مجموعات اجتماعية يمكنها أن تطوِّر أنماطًا سلوكيةً ليست أنانيةً خالصةً، بمعنى تعزيز بقاء الكائن أو نجاحه التكاثري على حساب بقاء غيره أو نجاحه التكاثري. من المغري الاعتقادُ بأن مثل هذه السمات، كمعاملة الغيرِ بإنصافٍ، تشكِّل جزءًا من تراثنا التطوري بوصفنا حيواناتٍ اجتماعيةً، تمامًا كما أن الرعاية الأبوية للأطفال لا بد أنها تمثِّل بالتأكيد سلوكًا مُطوَّرًا شبيهًا بذلك الذي تُظهِره حيوانات أخرى عديدة. ونؤكِّد مجددًا على أن هذا لا يعني أن كلَّ تفاصيل سلوك البشر خاضعةٌ لسيطرة الجينات، أو أنها تمثِّل سماتٍ تزيد من صلاحية البشر. علاوةً على ذلك، هناك صعوبةٌ كبيرة تكتنف إجراءَ اختبارات دقيقة للتفسيرات التطورية للسلوكيات البشرية.

هل ينطوي التطوُّر على تقدُّمٍ؟ الإجابة «نعم» مدوية؛ فقد تطوَّرَتْ أنواع أكثر تعقيدًا من الحيوانات والنباتات من أشكال أقل تعقيدًا، ويُظهِر تاريخُ الحياة تقدُّمًا عامًّا من

الكائنات الوحيدة الخلية البدائية إلى الطيور والحيوانات. لكن لا يوجد في نظرية التطور بالانتخاب الطبيعي ما يقترح أن هذا أمر حتمي، وبطبيعة الحال تظلُّ البكتيريا أحدَ أكثر أشكال الحياة وفرةً ونجاحًا في العالم. يشبه هذا الأمر شيوعَ الأدوات العتيقة التي لا تزال مفيدةً، مثل المطرقة، إلى جانب أجهزة الكمبيوتر في عالمنا المعاصر. إضافةً إلى ذلك، هناك أمثلة عديدة على اختزال التعقيد التطوري، مثل الأنواع التي تقطن الكهوفَ والتي فقدَتْ حاسةَ البصر، أو الطفيليات التي تفتقر للبنى والوظائف الضرورية من أجل البقاء المستقل. وكما أكَّدْنا في أكثر من موضعٍ، فإن الانتخاب الطبيعي لا يستطيع أن يتنبَّأ بالمستقبل بشكل مسبق، وهو يَركُم فحسب النُّسَخَ المفيدة في ظل الظروف السائدة، وكثيرًا ما قد يوفِّر التعقيدُ المتزايد طريقةَ عملٍ أفضل، كما في حالة الأعين، ومن ثَمَّ سيُحابيه الانتخابُ الطبيعي؛ وإذا لم تَعُدِ الوظيفةُ ذاتَ صلةٍ بصلاحية الكائن، فليس من قبيل المفاجأة أن تضمحل البنيةُ المرتبطة بها.

التطور أيضًا يعمل بلا رحمةٍ؛ فالانتخاب يعمل على شحْذِ مهارات الصيد والأسلحة التي يمتلكها الكائنُ المفترس، دون اعتبارٍ لمشاعر فريسته؛ وهو يطوِّر أدوات الطفيليات لتصبح بارعةً في غزو أجساد عوائلها، حتى لو تسبَّبَ ذلك في معاناة شديدة لتلك العوائل. وهو يتسبَّب في تطوُّر الشيخوخة، بل يمكن للانتخاب الطبيعي أن يؤدِّي إلى انحدار مستوى خصوبة النوع بحيث ينقرض تمامًا حين تسوء البيئة التي يعيش فيها. ومع ذلك، فإن نظرتنا لتاريخ الحياة التي كشف عنها السجلُّ الحفري، وكشف عنها التنوُّعُ الهائل في الأنواع التي تعيش اليومَ، تجعلنا نتعجَّب من نتائج أكثر من ٣ مليارات عام من التطور، بالرغم من حقيقة أن كل هذا إنما نتج «من حرب الطبيعة؛ من المجاعات والموت»، بحسب تعبير داروين. يمكن لفهم التطوُّر أن يعلِّمنا الكثيرَ بشأن موضعنا الحقيقي في الطبيعة، بوصفنا جزءًا من طيف هائل من الكائنات الحية التي أنتجَتْها القوى العمياءُ للتطور، وهذه القوى التطوريةُ منحَتْ نوعَنا تلك القدرةَ المتفردة على التفكير، بحيث يمكننا أن نستخدم بصيرتَنا في تحسين «حرب الطبيعة». ينبغي لنا أن نُعجَب بما أنتجه التطور، وأن نحرص على ألَّا ندمِّر هذا الإرثَ بأفعالنا الجشعة الحمقاء، وأن نحافظ عليه من أجل أبنائنا؛ وإذا فشلنا في عمل هذا، فسينقرض نوعنا، شأنه شأن العديد من الكائنات الحية البديعة.

# قراءات إضافية

It is well worth reading *On the Origin of Species* by Charles Darwin (John Murray, 1859); the masterly synthesis of innumerable facts on natural history to support the theory of evolution by natural selection is dazzling, and much of what Darwin has to say is still highly relevant. There are many reprints of this available; Harvard University Press have a facsimile of the first (1859) edition, which we used for our quotations.

Jonathan Howard, *Darwin: A Very Short Introduction* (Oxford University Press, 2001) provides an excellent brief survey of Darwin's life and work.

For an excellent discussion of how natural selection can produce the evolution of complex adaptations, see *The Blind Watchmaker: Why The Evidence of Evolution Reveals a Universe without Design* by Richard Dawkins (W.W. Norton, 1996).

*The Selfish Gene* by Richard Dawkins (Oxford University Press, 1990) is a lively account of how modern ideas on natural selection account for a variety of features of living organisms, especially their behaviour.

*Nature's Robots. A History of Proteins* by Charles Tanford and Jacqueline Reynolds (Oxford University Press, 2001) is a lucid history of discoveries concerning the nature and functions of proteins, culminating in the deciphering of the genetic code.

Enrico Coen, *The Art of Genes. How Organisms Make Themselves* (Oxford University Press, 1999) provides an excellent account of how genes control development, with some discussion of evolution.

For an account of the application of evolutionary principles to the study of animal behaviour, see *Survival Strategies* by R. Gadagkar (Harvard University Press, 2001).

Richard Leakey and Roger Lewin, *Origins Reconsidered: In Search of What Makes Us Human* (Time Warner Books, 1993) gives an account of human evolution for the general reader.

J. Weiner, *The Beak of the Finch* (Knopf, 1995) is an excellent account of how work on Darwin's finches has illuminated evolutionary biology.

B. Hölldobler and E. O. Wilson, *Journey to the Ants. A Story of Scientific Exploration* (Harvard University Press, 1994) is a fascinating account of the natural history of ants, and the evolutionary principles guiding the evolution of their diverse forms of social organization.

For a discussion of the fossil evidence for the early evolution of life, and experiments and ideas on the origin of life, *Cradle of Life. The Discovery of Earth's Early Fossils* by J. William Schopf (Princeton University Press, 1999) is recommended.

*The Crucible of Creation* by Simon Conway Morris (Oxford University Press, 1998), which is beautifully illustrated, provides an account of the fossil evidence on the emergence of the major groups of animals.

## كتب أكثر تخصُّصًا (تتطلَّب معرفةً متقدِّمةً في الأحياء)

*Evolutionary Biology* by D. J. Futuyma (Sinauer Associates, 1998) is a detailed and authoritative undergraduate textbook on all aspects of evolution.

And a somewhat less detailed undergraduate textbook of evolutionary biology: *Evolution* by Mark Ridley (Blackwell Science, 1996).

*Evolutionary Genetics* by John Maynard Smith (Oxford University Press, 1998) is an unusually well-written text on how the principles of genetics can be used to understand evolution.

For a comprehensive account of the interpretation of animal behaviour in terms of natural selection, refer to *Behavioural Ecology* by J. R. Krebs and N. B. Davies (Blackwell Science, 1993).

# مصادر الصور

(3–1) From J. Z. Young, *The Life of Vertebrates,* Oxford University Press, 1962 (Hands and feet, bird skeleton). From R. L. Carroll, *Vertebrate Paleontology and Evolution,* W. H. Freeman, New York, 1988 (Bat skeleton).

(3–2) From Charles Darwin, *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex.*

(3–3) © Don Fawcett/Science Photo Library (Eukaryote). © A. B. Dowsett/Science Photo Library (Prokaryote).

(3–5) From R. E. Dickerson & I. Geis, *Hemoglobin: Structure, Function, Evolution, and Pathology.* Benjamin Cummings, California, 1983.

(3–7) From C. P. Swanson, *Cytology and Cytogenetics,* Macmillan, 1958.

(4–1) From L. B. Halstead, *Hunting the Past,* Hamish Hamilton, 1983.

(4–2) From L. B. Radinsky, *The Evolution of Vertebrate Design,* University of Chicago Press, 1987.

(4–3) From B. A. Malmgren, W. A. Berggren, and G. P. Lohmann, 1983. Evidence for punctuated gradualism in the late neogene globorotalia–tumida lineage of planktonic–foraminifera. *Paleobiology* 9(4): 377–389, 1983.

(4-4) From S. Carlquist, *Island Biology,* Columbia University Press, 1974. This was re-drawn from R. I. Bowman, *Evolution patterns in Darwin's finches,* Occasional Papers of the California Academy of Sciences 44, 1963.

(4-5) From K. J. Burns, S. J. Hackett and N. K. Klein, *Evolution,* Society for the Study of Evolution, 2002.

(5-1) From J. Z. Young, *The Life of Vertebrates,* Oxford University Press, 1962.

(5-2) From H. Curtis & N. S. Barnes, *Biology,* 5th edition, Worth, New York, 1968 (Cabbages). © David Allan Brandt/Stone/Getty Images (Dogs).

(5-3) From H. Curtis & N. S. Barnes, *Biology,* 5th edition, Worth, New York, 1968.

(5-4) From Charles Darwin, *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex.*

(6-2) From G. A. Wray, Dating branches on the tree of life using DNA. *Genome Biology* 3, 2001.

(7-1) From B. Rensch, *Evolution Above the Species Level,* © Columbia University Press 1958. Reprinted with permission of the publisher.

(7-2) From B. Hölldobler & E. O. Wilson, *Journey to the Ants,* Belknap Press/Harvard University Press, 1994.